

30-0205/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Bestimmung der Austrocknungszeit
von Neubauten

unter dem Gesichtspunkt der Entstehung von Feuchtigkeitsschäden
mit besonderer Berücksichtigung der Einwirkung von Schlagregen
einerseits und des Einflusses der hohen Fugendichtigkeit von
modernen Fenstern andererseits

von

Dr.-Ing. J. Steinert

Braunschweig, April 1987

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden gefördert mit Hilfe von Forschungs-
mitteln des Landes Niedersachsen.

I n h a l t

	Seite
1. Veranlassung und Zielsetzung, Versuchsprogramm	2
2. Literaturlauswertung	7
3. Durchführung der Untersuchungen	21
3.1 Versuchshaus	21
3.2 Meßwerte und zeitlicher Ablauf der Untersuchungen	25
3.2.1 Raumklima	25
3.2.2 Außenklima	26
3.2.3 Gravimetrische Feuchtebestimmung	27
3.3 Ergänzende Untersuchungen	33
3.3.1 Ermittlung der Baustofffeuchte aus der relativen Luftfeuchtigkeit	33
3.3.2 Austrocknung von Gasbeton-Innenwänden	35
3.3.3 Änderung der relativen Luftfeuchte in Räumen durch Austrocknung von Bauteilen	38
4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	40
5. Literaturhinweise	44

1. Veranlassung und Zielsetzung, Versuchsprogramm

Im Geschoßwohnungsbau hat in den letzten Jahren die Anzahl der Feuchteschäden, erkennbar durch Schimmelbildung, erheblich zugenommen. Bemerkenswert erscheint dabei die Tatsache, daß die Klagen über derartige Schäden bereits Ende der sechziger Jahre, also noch vor der Energiekrise (1973), begannen. Diese Feuchteschäden sind nicht allein auf falsches Nutzer/Mieter-Verhalten, d.h. ungenügendes Heizen und Lüften, zurückzuführen, sondern auch auf bauliche Mängel und Gegebenheiten, wie durch gezielte Untersuchungen festgestellt werden konnte.

Betroffen von Feuchteschäden waren - und sind auch noch gegenwärtig - auch neuere Bauten, in deren Wandquerschnitt häufig ein hoher Feuchtegehalt festgestellt werden konnte. Es wurde daraus der Schluß gezogen, die Austrocknungszeit, insbesondere von Bauten aus gut wärmedämmendem Mauerwerk - ggf. mit wasserabweisenden Putzen oder mit Verblendmauerwerk - sei bei Vorhandensein fugendichter Fenster erheblich größer als bisher angenommen. Damit würde aber der der Gebäudeplanung zugrunde liegende rechnerische Wärmeschutz erst viel später als bisher angenommen erreicht werden, etwa erst nach 4 bis 5 Jahren, ungünstigenfalls überhaupt nicht.

Als Ursache vermuteter längerer Austrocknungszeiten, also verringerter und somit verzögerter Feuchteabgabe des Mauerwerks, kommen infrage:

1. Höherer Diffusionswiderstand vorzugsweise auf der Außenseite von Wänden, z.B.

- von Putzen mit Zusatzmitteln zur Gewährleistung der Schlagregendichtigkeit,
- durch Verwendung von Klinkern als Vormauerziegel vor hochwärmedämmendem Mauerwerk, aber auch
- von Hochlochziegeln geringerer Wasserdampfdurchlässigkeit, vermutlich herstellungsbedingt, um bei möglichst kleiner Ziegelrohddichte dieselbe Druckfestigkeit wie früher zu erreichen.

2. Höhere Luftfeuchte in Räumen, und somit geringere "Beladbarkeit" der Raumluft mit Baufeuchte - insbesondere im Zusammenhang mit einem veränderten Heiz- und Lüftungsverhalten, vor allem bei zu frühem Bezug von Neubauten, d.b. zusätzliche Feuchtezufuhr während der Zeit erheblicher Feuchteabgabe von Außen- und auch von Innenbauteilen.

Während im ersten Fall der Einfluß auf die Austrocknungszeit baustoff- oder baukonstruktiv bedingt wäre, ist er im zweiten Fall nutzungsbedingt.

Beispiele für die Veranlassung zu diesem Forschungsvorhaben sind aus den in Anlage 1 zusammengestellten Ergebnissen ausgewählter Schadensfälle ersichtlich: drei bis vier Jahre nach Erstbezug bzw. vier bis fünf Jahre nach Rohbauerstellung weicht der Feuchtegehalt im Mauerwerk noch ganz erheblich vom Praktischen Feuchtegehalt gemäß DIN 4108 bzw. DIN 52 612 ab. In den Innenräumen waren schwere Schäden vorhanden. Keine der Wohnungen war jedoch übermöbliert, keine überbelegt; allerdings waren Verdachtsmomente auch auf bauliche Ursachen nicht auszusräumen.

Eine Erhebung im ostniedersächsischen Raum - auf der Grundlage einer Umfrage bei Wohnungsbewirtschaftungsunternehmen mit großem Wohnungsbestand /23/ hat 1983 ergeben, daß in 1 bis 10 % aller Neubauten oder modernisierten Bauten Feuchteschäden auftreten, die in vielen Fällen zu Rechtsstreitigkeiten führen. Das ist ein untragbarer Zustand, der nur dann zu beseitigen sein wird, wenn alle Schadensursachen erkannt und Zweifel an der Tauglichkeit unserer Baukonstruktionen ausgeräumt werden.

"Für das Verständnis der Entstehung von Feuchteschäden in Neubauten ist es wichtig, die sich überlagernden Einflüsse von Austrocknung der Rohbaufeuchte, Feuchtezufuhr von außen durch Niederschläge, insbesondere Schlagregen, Diffusionskondensat von innen und zeitweilig gespeichertes Oberflächenkondensat, kurz die Überlagerung von Diffusion und kapillaren Transportvorgängen, zu trennen und in ihrer Wechselwirkung zu studieren."

Dieses, hier aus dem Forschungsantrag von 1983 zitierte allgemeine Ziel ist zwischenzeitlich von Kießl /22/ erreicht worden, der mit neuen Ansätzen einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des Feuchtetransports in Baustoffen und Bauteilen geleistet hat. Dabei hat sich gezeigt, daß

die quantitative Erfassung der Gesamtsproblematik nicht nur die Aufstellung größerer Rechenprogramme, sondern auch die Kenntnis allgemein nicht eingeführter Kennwerte für das Baustoffverhalten in bezug auf Feuchte-transport und -speicherung voraussetzt.

Ein weiteres Ziel dieses Vorhabens bestand in der Ausarbeitung eines Vorschlages zur Ergänzung von DIN 4108 derart, daß für Neubauten eine Abschätzung der Austrocknungszeit bis zum Erreichen des Praktischen Feuchtegehalts ermöglicht und damit Kenntnis erlangt wird über die erforderliche Zeit mit zusätzlichem Heizungs- und Lüftungsaufwand oder - anders ausgedrückt - für die Zeit mit eingeschränkten Nutzungsmöglichkeiten. Also der Zeit, die man auch im Zeitalter hohen Investitionsaufwandes zwischen Fertigstellung und Bezug verstreichen lassen sollte, um den gerade heute großen Schadensrisiken (dichte Fenster) des "Trockenwohnens" zu entgehen.

Voraussetzung für eine derartige Ergänzung der einschlägigen Bestimmungen war aber die Überprüfung der Austrocknungszeit von Neubauten. Entsprechende Untersuchungen in der Vergangenheit liegen Jahrzehnte zurück und sind möglicherweise durch baustofftechnologische Entwicklungen überholt. Deshalb sollte an sechs Neubauten mit Außenwänden aus Mauerwerk, errichtet mit unterschiedlichen Baustoffen

Gasbeton-Blocksteine, porosierte Ziegel oder Hochlochziegel und Kalksandsteine,
jeweils mit Außenputz und Verblendmauerwerk

die zeitliche Änderung der Feuchte über den Wandquerschnitt sowohl durch Messungen der elektrischen Leitfähigkeit als auch durch gravimetrische Kontrollmessungen bestimmt und den klimatischen Daten sowie den bauphysikalischen Kennwerten der Baustoffe für Wassereindringung, Wasserdurchlässigkeit und Wasserdampfdurchlaß gegenübergestellt werden. Durch innenseitige Anbringung von Dampfsperren und außenseitige Anbringung von Regenschutzverkleidungen auf unterschiedlichen Teilflächen sollte eine Trennung einzelner Feuchte-Transportvorgänge erreicht werden.

Zunächst war beabsichtigt, durch Zusammenarbeit mit Wohnungsbau- und/oder Wohnungsbewirtschaftungsunternehmen dieses Programm möglichst in bewohnten Neubauten zu verwirklichen. Wegen erheblicher Schwierigkeiten mußte jedoch auf diese Möglichkeit verzichtet werden: Schrumpfendes Neubauaufkommen,

gestreckte Bauzeit und damit nicht gleichzeitige Durchführbarkeit aller geplanten Untersuchungen, nicht mit den ursprünglichen Absichten zu vereinbarende Bauausführung, nicht hinreichend lange Nutzungsdauer bzw. Eingriffe in die geplanten Prüfmodalitäten, Vorbehalte gegen eine zerstörende Probenahme (Bohrkerne zur Feuchtebestimmung) sowie ungleiche Lage der Wohnungseinheiten zur Himmelsrichtung machte eine andere Durchführung erforderlich.

Auf einem geeigneten Gelände, nach Westen unverbaut, wurde ein Meßhaus mit 44 m³ Raumvolumen errichtet, dessen eine rd. 10 m lange, nach Westen orientierte Außenwand abschnittsweise aus den zu untersuchenden Wandkonstruktionen bestand, siehe Anlage 2.

Die Vorteile dieser Lösung waren:

- das Meßhaus war jederzeit zugänglich,
- aus den Wänden konnten ohne Bedenken Bohrkerne zur gravimetrischen Bestimmung des Feuchtegehaltes entnommen werden,
- das Mauerwerk - wie auch das gesamte Meßhaus - konnte mit instituts-eigenen Facharbeitern errichtet werden; die verwendeten Baustoffe waren somit bekannt,
- alle Wandkonstruktionen waren demselben Außenklima sowie demselben Raumklima (Beheizung und Belüftung) ausgesetzt,
- im Mauerwerk konnten Elektroden zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit nach eigener Maßgabe eingebaut werden.

Diesen Vorteilen standen jedoch folgende Nachteile gegenüber:

- die Wandstreifen unterschiedlicher Konstruktion waren relativ schmal: Breite 1,00 m/Höhe 2,00 m,
- von der Raumseite her war eine Feuchteumschichtung nicht auszuschließen: Die Austrocknung schnellaustrocknender Wände aus kapillaraktiven Baustoffen mit geringem Feuchtegehalt könnte durch beständige Feuchteabgabe langsam austrocknender Wände mit hohem Anfangsfeuchtegehalt verzögert worden sein,

- das Versuchshaus war nur "künstlich bewohnt", d.h. zwar beheizt und belüftet, aber eben nicht in natürlicher Weise; damit fehlten wesentliche Voraussetzungen für die Entstehung von Feuchteschäden, z.B. Pilzsporen,
- aus Kostengründen mußten Einschränkungen hingenommen werden, z.B. wurde das Außenklima aus den Bodenwettermeldungen des Amtlichen Wetterberichts für die Station Braunschweig-Völkenrode entnommen und die Schlagregenbeanspruchung nur theoretisch nach den Angaben von Lacy /11/ aus der Normalregenmenge ermittelt. Außerdem konnten wegen der hohen Kosten die Baustoffeigenschaften (μ , w , κ u.a.) nicht ermittelt werden.

Entgegen der ursprünglichen Absicht wurde die Austrocknungsbehinderung durch eine äußere dampfdichte Verkleidung auf Teilflächen nicht speziell untersucht, hierfür gibt es mehrere Gründe:

Jeder Neubau hat einen hohen Feuchtegehalt, der weit oberhalb der Gleichgewichtsfeuchte liegt. Diese Neubaufeuchte trocknet sowohl nach außen als auch nach innen aus. Die Austrocknung von Bauteilen/Baustoffen erfolgt in Abhängigkeit von den Übergangsbedingungen zur Luft (außen und innen) als auch von der stofflichen Struktur (kapillares Saugvermögen für den Feuchteschub aus dem Inneren zur Oberfläche sowie Diffusionswiderstand nicht kapillar aktiver Schichten). Bei einer Abdichtung einer Seite wird nicht nur die Masse der austrocknenden Feuchte verringert, sondern auch die Zeit für die Austrocknung verlängert. Da das Vorhaben zunächst nur für ein- bis maximal zwei Jahre angesetzt war, hätte in dieser Zeit der Gleichgewichtszustand bei behinderter Austrocknung nach außen nicht erreicht bzw. abgeschätzt werden können.

Eine Beurteilungsmöglichkeit ergab sich bei den durchgeführten Untersuchungen dennoch durch die Gegenüberstellung der Austrocknungszeiten von Außenwänden aus gleichartigem Mauerwerk mit Außenputz bzw. mit Vormauerziegel-Verblendung.

Außerdem wurde bei der Literatursauswertung festgestellt, daß Künzel /12/ bereits 1965 für die auch hier untersuchten Baustoffe Gasbeton und Hochlochziegel gezeigt hat, daß Ziegelmauerwerk auch dann noch hinreichend austrocknet, wenn außen eine dampfdichte Schicht angebracht wird. Die Entfeuchtung von Gasbeton (17,5 cm dick) war deutlich verzögert: In gut zwei Jahren nahm die Feuchte nur von ca. 26 Vol.-% auf etwa 12 Vol.-% ab.

Ferner ist noch darauf hinzuweisen, daß eine rechnerische Diffusionsbetrachtung, etwa nach DIN 4108 o.ä. Rechenverfahren, nur für trockenes Mauerwerk sinnvoll ist.

Der Schlagregeneinfluß konnte durch Vergleich der Austrocknungszeiten gleichartigen Mauerwerks, mit Putz bzw. Verblendmauerwerk, erkannt werden.

Während der Laufzeit dieses Vorhabens, von der Bewilligung bis zum Beginn der Berichterstattung, wurde Gelegenheit gesucht, ergänzende baupraktische Beispiele zur Austrocknung von Mauerwerk oder von Feuchteschäden in Neubauten zu bearbeiten und ergänzende Untersuchungen durchzuführen. Diese Ergebnisse und Erfahrungen sind im folgenden mit berücksichtigt.

2. Literaturlauswertung

Die Prinzipien der Austrocknung poröser Stoffe hat zuerst (etwa ab 1938) Krischer /1/ und /6/ beschrieben. Danach läßt sich der Trocknungsvorgang übersichtlich darstellen, wenn die Austrocknungsgeschwindigkeit über dem volumetrischen Feuchtegehalt des Stoffes aufgetragen wird /6/, /10/ oder /17/, siehe Bild 1.

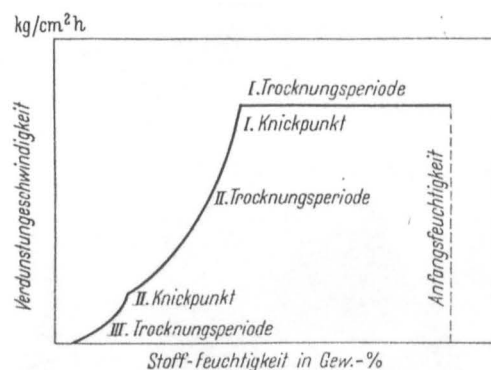


Bild 1: Austrocknungsverlauf poröser, hygroskopischer Stoffe

In einem derartigen Diagramm lassen sich drei Bereiche unterscheiden:

1. Trocknungsabschnitt: Feuchtetransport aus dem Baustoff durch Kapillarleitung, Austrocknungsgeschwindigkeit annähernd konstant, jedoch abhängig von Temperatur der trocknenden Fläche sowie Temperatur, Feuchte und Bewegung der angrenzenden Luftschicht.
2. Trocknungsabschnitt: Austrocknungsgeschwindigkeit plötzlich abfallend, Feuchtetransport aus dem Baustoff, teils durch Kapillarleitung, teils durch Diffusion.
3. Trocknungsabschnitt: Austrocknungsgeschwindigkeit nochmals plötzlich abfallend, Feuchtetransport nur noch durch Diffusion bis zum Ende der Trocknung: Erreichen der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte.

Künzel hat in /17/ die Grenze zwischen den Trocknungsabschnitten 1 und 2 der wegen ihrer unterschiedlichen Porenstruktur interessanten Baustoffe Ziegel, Kalksandstein und Gasbeton untersucht und den "kritischen Feuchtegehalt" dieser drei Baustoffe zu 6, 11 bzw. 19 Vol.-% bestimmt. Für die Grenze zwischen den Trocknungsabschnitten 2 und 3 bei Gasbeton gibt Kießl /22/ 6 Vol.-% an.

Hieran wird deutlich, daß im Hinblick auf die Austrocknung von Neubauten die Wasserdampfdiffusion erst dann eine Rolle spielt, wenn sich der Feuchtegehalt der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte nähert. Dies zeigt auch eine andere Untersuchung von Künzel /11/. An kleinformatigen Proben wurde - nach Wasserlagerung - die Austrocknung beobachtet und den Meßwerten die rechnerische Austrocknung allein durch Diffusion gegenübergestellt, siehe Bild 2. Nach dieser Untersuchung spielt offenbar bei Vollziegeln und Gasbeton, beide mit Kalkputz, die Differenz erst eine Rolle, wenn der Feuchtegehalt kleiner ist als 1 kg bzw. 7 kg je m^2 Verdunstungsfläche oder schätzungsweise kleiner als 1,7 und 11,7 Vol.-% für Ziegel bzw. Gasbeton. Daran zeigt sich deutlich das unterschiedliche kapillare Verhalten der beiden Baustoffe.

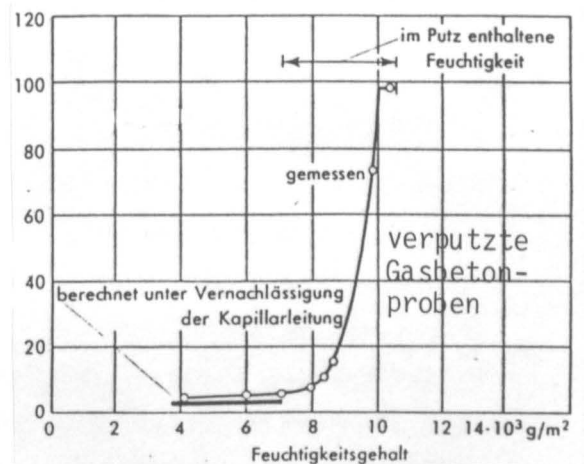
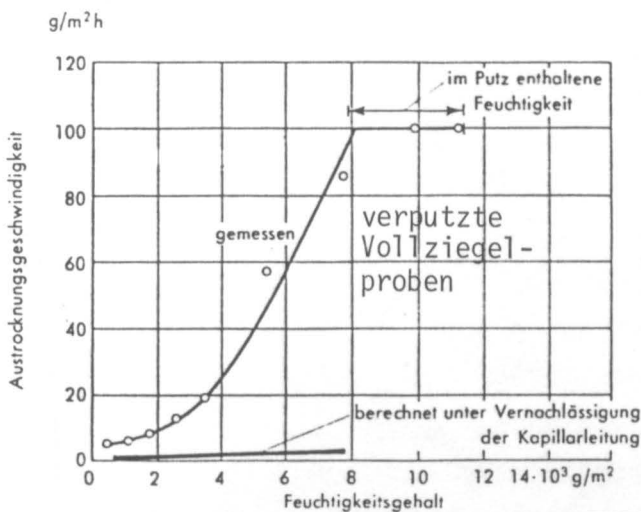


Bild 2: Austrocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Experimentelle und rechnerische Ermittlung, letztere unter Vernachlässigung der Kapillarleitung, nach /11/.

Wesentliche Untersuchungen über die Austrocknung von Baustoffen stammen bereits von Haller /1/. Auf der Grundlage früher Arbeiten von Krischer u.a. ist es vermutlich die erste Arbeit, in der Befeuchtung und Austrocknung von Baustoffen richtig gedeutet werden: Bei der Feuchteaufnahme der Baustoffe aus der Luft spielen Sorption und Kapillarkondensation die dominierende Rolle, während für die Aufnahme tropfbaren Wassers die Kapillarleitung maßgebend ist - und umgekehrt bei der Feuchteabgabe anfänglich die kapillare Leitung, dann aber zunehmend Diffusion und mit fortschreitender Austrocknung die Sorption den Austrocknungsvorgang bestimmen.

Interessant an der Arbeit von Haller sind noch heute folgende Aspekte:

1. Austrocknungsversuche an 12 Baustoffproben, die zum Teil "vom Baumarkt" stammten oder/und von sonst unbekannter Herkunft waren. Nach Imprägnierung 7 cm dicker Proben auf vier(!) Seiten, derart daß 45 cm² Verdunstungsfläche verblieben, wurde - nach Wasserlagerung - die Austrocknung durch Wägung über einen Zeitraum von vier Jahren bestimmt.

Die Zeit bis zum Erreichen eines Feuchtegehaltes, der um 0,5 Vol.-% über der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte liegt, ist in Tabelle 1 angegeben. Die Zeit, die bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte vergeht, ist mindestens doppelt so groß!

2. Die zur Auswertung angewendete Theorie auf der Grundlage der Stefan-schen Oberflächendiffusion in Rohren (Überlagerung von Diffusion und Strömung; h: Abstand eines Flüssigkeitsmeniskus vom Rohrende bzw. Abstand des Flüssigkeitsspiegels von der Oberfläche einer austrocknenden Wand). Damit wird die Austrocknungszeit t bis zum Erreichen der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte proportional h^2 , wobei die von Haller aus den Versuchsergebnissen entnommene Proportionalitätskonstante zahlenmäßig nicht mit dem theoretischen Ansatz übereinstimmt, weil die Kapillarität weitgehend vernachlässigt wird; insbesondere wird nicht beachtet, daß sich beim kapillaren Saugen der Flüssigkeitsspiegel ebenfalls gemäß $h^2 \sim t$ verändert und deshalb aus der Wirkung keine Trennung der Ursachen (Kapillarität oder Diffusion) möglich ist. Trotzdem kommt Haller zu dem bekannten Schluß, daß gelten müsse: $t_2 = (h_2/h_1)^2 \cdot t_1$ für die Austrocknungszeit t_2 eines Bauteils der Dicke h_2 , wenn die Austrocknungszeit t_1 eines Bauteils aus demselben Baustoff der Dicke h_1 bekannt ist.

Tabelle 1: Austrocknungszeiten verschiedener Baustoffe nach Haller /1/

Baustoff	Zeit bis Gleichgewicht + 0,5 Vol.-%		
	$\varphi = 97 \%$ Tage	$\varphi = 70 \%$ Tage	$\varphi = 35 \%$ Tage
Backstein	982	40	23
Kalksandstein	365	180	95
Beton P.250	42	234	296 *
Zementstein	162	136	254 *
Zementmörtel 1:6 G.T.	> 975	365	650 *
Leichtbeton	234	180	29
Tuffzementstein	>1230	168	113
Bimsbeton	705	209	38
Hydr. Kalkmörtel 1:4 G.T.	547	38	28
" " 1:6 G.T.	628	34	25
Kork	180	20	16
Fichte, Stirn	365	38	25
" radial	289	142	289 *
" tangential	43	18	190 *

*) Die bei 35 % rel. Luftfeuchtigkeit längeren Austrocknungszeiten als bei 70 % erklären sich durch die Vorgabe "Gleichgewichtsfeuchte + 0,5 Vol.-%": Bei nicht kapillaraktiven Stoffen ist die Zeitspanne bis zum Erreichen der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte - bei geringer Luftfeuchte - erheblich länger als bei wassersaugenden Baustoffen.

3. Das Ergebnis für die Gleichgewichtsfeuchte von 12 cm dickem Mauerwerk: Ziegelmauerwerk 0,10 bis 1,6 Vol.-%, Kalksandsteinmauerwerk 3,0 bis 3,5 Vol.-%.

Haller betont, daß die von ihm bestimmten Austrocknungszeiten für unverputztes, beidseitig von der Außenluft umspültes Mauerwerk gelten; obwohl er genaugenommen nur Baustoffproben untersucht hat.

Die Arbeit von Haller fand offenbar zeitweilig wenig Beachtung. Cadiergues /2/ hat die Angaben gemäß Tabelle 1 - für die Austrocknungszeit + 0,5 Vol.-% bei 70 % Luftfeuchte - auf 1 cm Probendicke bezogen und für die Austrocknungszeit die Formulierung benutzt $t = s \cdot e^2$ (e entspricht h), mit s als baustoffabhängigem Faktor, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Austrocknungszeiten verschiedener Baustoffe "nach Cadiergues"/2/

MATÉRIAU	s
	j/cm
Béton (dosé à 250 kg)	1,6
Béton de ponce	1,4
Béton cellulaire	1,2
Brique	0,28
Calcaire	1,2
Liège	0,14
Mortier de chaux	0,25
Mortier de ciment	2,5
Pin	0,9

Bei Angaben der Austrocknungszeit bezog man sich in der Folgezeit vorrangig auf Cadiergues, z.B. in /9/, /13/ oder /21/, der aber in seiner Schrift Haller durchaus korrekt zitiert hat.

Weil der Wärmeschutz von Außenbauteilen gegebener Rohdichte weitgehend vom Feuchtegehalt bestimmt wird, sind in den Nachkriegsjahren zahlreiche Untersuchungen des Feuchtegehalts in hinreichend ausgetrockneten Bauten durchgeführt worden, insbesondere um den "Praktischen Feuchtegehalt", ein Begriff, der auf J.S. Cammerer zurückgeht /13/, festzustellen. Dieser Praktische Feuchtegehalt, der im Idealfall hinreichend trockener Bausubstanz mit der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte übereinstimmt, wird heute in DIN 4108 angegeben, früher in DIN 52 612 - mit von Ausgabe zu Ausgabe unterschiedlichen Zahlenwerten.

Nach Schüle, der in /13/ zuletzt das Schrifttum zur Feuchtigkeit in Bauteilen von Wohnhäusern zusammengefaßt hat, ist davon auszugehen, daß verputzte Außenwände sowohl

- aus Hochlochziegeln
von 9 bis 19 Vol.-% auf 0,5 bis 4 Vol.-%,
bei 24 cm Wanddicke; erste Messung nach Rohbauerstellung, als auch
- aus Gasbeton
von 5 bis 8 Vol.-% auf 1,5 bis 4 Vol.-%,
bei 15 cm Wanddicke; erste Messung 2 bis 3 Monate nach Rohbauerstellung,

in 1,5 Jahren austrocknen. Entsprechende Angaben für Kalksandstein liegen nicht vor. Weitere Angaben beziehen sich auf Mauerwerksarten, die heute an Bedeutung verloren haben.

Die Feuchte von Außenwänden mit Außenputz hängt in erheblichem Umfang von ihrer Lage zur Hauptwetterrichtung ab. Nach den Ergebnissen der von Kristen und Blunk /7/ durchgeführten Beregnungsversuche spielt dabei das Mauer-material erst dann eine Rolle, wenn der Außenputz schadhaft ist.

Untersuchungen an Versuchshäusern in Holzkirchen in den Jahren 1952 /5/ bis 1965 /8/ ließen jedoch vermuten, daß der Feuchtegehalt in häufig beregneten Außenwänden sowohl von der Art des Mauerwerks als auch von den Eigenschaften des verwendeten Außenputzes abhängig ist: Während die Dichtigkeit des Putzes die Menge der eindringenden Feuchte bestimmt, hängt die Austrocknung von den feuchtetechnischen Eigenschaften des Mauerwerks ab, wie Künzel durch gezielte Untersuchungen nachweisen konnte /11/.

Bei den älteren Untersuchungen /4/ bis /9/ fand die Abhängigkeit des Feuchtegehaltes von Außenwänden von der Himmelsrichtung große Beachtung. Damit war auch der Einfluß erkannt, den der Putz sowohl für die Abwehr von Schlagregen als auch für das Austrocknen der Wände besitzt. Insbesondere Künzel hat sich in vielen Untersuchungen und Veröffentlichungen um diese Frage verdient gemacht und sich dafür eingesetzt, Anforderungen an Außenputze durch Grenzwerte für Wasseraufnahme und Diffusionswiderstand zu beschreiben, die inzwischen Eingang in DIN 18 550 gefunden haben. In diesem Zusammenhang finden sich in einer neueren Veröffentlichung /25/ zwei wichtige Bezüge zu dem hier anstehenden Problem, siehe Bild 3 und Tabelle 3.

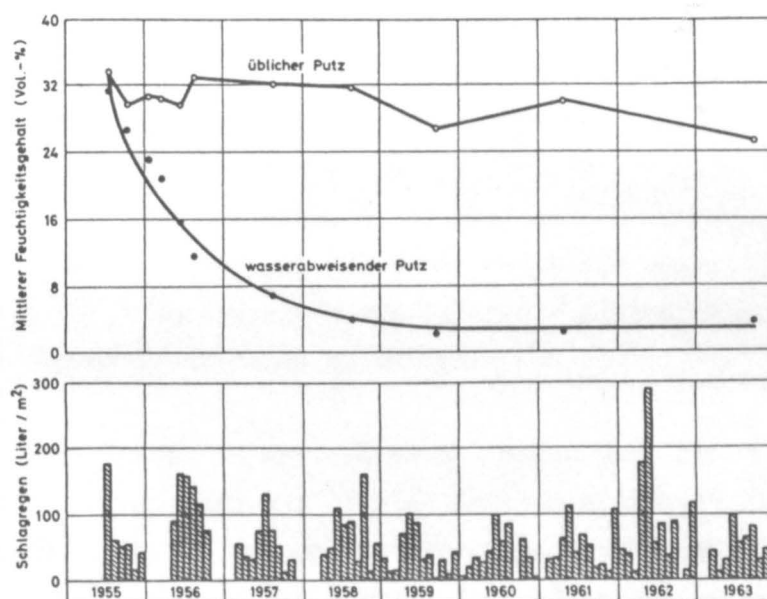


Bild 3: Mittlere Feuchtegehalte einer nach Westen orientierten Gasbetonwand mit wasserabweisendem Putz bzw. üblichem Putz im Verlauf von 9 Jahren mit Angabe der Schlagregenbeanspruchung, nach /5/.

Die hier in Bild 3 von Künzel zitierte Zeitabhängigkeit des Feuchtegehalts einer Gasbetonwand mit "üblichem Putz", über einen Zeitraum von neun Versuchsjahren, konnte bei den vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden.

Tabelle 3: Art und Zahl von insgesamt besichtigten Räumen und Räumen mit Feuchteschäden in Wohnungen mit Außenwandorientierungen nach Westen bzw. Osten (Doppelhäuser in München) /5/

	Orientierung nach Westen			Orientierung nach Osten		
	Wohnräume	Schlafräume	Küchen	Wohnräume	Schlafräume	Küchen
Besichtigte Räume	10	13	7	5	8	4
Mit Feuchteschäden (Schimmel)	6	6	6	0	0	1
Schadensquote	60%	45%	85%	0%	0%	25%

Auch die in Tabelle 3 angeführte, 30 Jahre alte statistische Auswertung der Feuchteschäden in Abhängigkeit von Himmelsrichtung und Raumnutzung findet in neueren Bauten keine Bestätigung: Die Schadensausprägung ist nicht auf die Wetterseite beschränkt, siehe Anlage 1 - in Neubauten nicht einmal auf Außenwände - und die Schadenshäufigkeit entspricht jetzt der Reihung: Schlafzimmer, Kinderzimmer, Bäder/Duschen, Küchen und Wohnzimmer! Die Ursachen für die Unterschiede mögen einerseits in der verminderten Schlagregenanfälligkeit moderner Putze liegen, vielleicht auch in veränderten Kochgewohnheiten, andererseits sind die bekannten Einflüsse dichtschießende Fenster, veränderte Heizungsarten - Zentralheizung statt Einzelofenheizung - und Heizungsgewohnheiten ein Grund für die verschobene Statistik. Hinsichtlich des Lüftungsverhaltens ist aber auch zu bedenken, daß sich Verkehrslärm, Luftverschmutzung und Einbruchgefahr ungünstig entwickelt haben und es daher - zumindest in den Städten - angeraten erscheint, die Fenster überwiegend geschlossen zu halten.

Übrigens forderte Künzel in der zitierten Arbeit über die "Feuchtigkeitsverhältnisse in Außenwänden mit dichter Außenverkleidung" /12/ aufgrund der langsameren Trocknung und des höheren Dauerfeuchtegehaltes auf der Außenseite dichter Wände, daß - unter Zugrundelegung einer relativen Raum-

Luftfeuchte von höchstens 45 % im Mittel - die Wärmedämmung der Wände an jeder Stelle so hoch sein müsse, "daß mit Sicherheit das Auftreten von Tauwasserbildung an den Innenoberflächen vermieden wird, auch bei erhöhtem Anfangsfeuchtegehalt der Wände".

Diese, heute gewiß nicht mehr aufrechterhaltene Forderung ist, wenngleich wünschenswert, nicht durchsetzbar:

- Ist der Feuchtegehalt - eines beliebigen Baustoffes - größer als seiner hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte für 100 % entspricht, wird eine hohe Feuchtebelastung der Raumluft erfolgen. Nur durch ständigen Luftaustausch kann in dieser Bauphase Tauwasserausfall mit Folgeschäden vermieden werden. Ein zu früher Bezug - mit entsprechender normaler Nutzung - ist deshalb nicht möglich, vermutlich auch nicht, wenn der Wärmeschutz durch Ausführung größerer Wändicken verbessert wird. Immerhin deuten Feuchteschäden in Neubauten darauf hin, daß der umgekehrte Weg: Immer weniger Wärmeschutz in Verbindung mit hoher Baufeuchte (Herstellungsfeuchte und "eingebaute" Baustofffeuchte) neue Schadensquellen erschließt; Beispiel: zentralbeheizte Treppenträume mit geringen Anforderungen an den Wärmeschutz und nur durch Vollsteinwände erfüllbare hohe Anforderungen an den Schallschutz.
- Wegen des Anfangsfeuchtegehaltes bei Bezug von Wohnungen wären erhebliche Zuschläge auf die aus statischen und wärmetechnischen Gründen im ausgetrockneten Zustand notwendige Mindestdicke erforderlich: bei 3 bis 5 % Zuschlag auf die Wärmeleitfähigkeit je Vol.-% Feuchte wären mindestens 30 % größere Wändicken erforderlich, um die o.g. Forderung zu erfüllen.

In den letzten Jahren wird der Gedanke wieder aufgegriffen, anstelle des Praktischen Feuchtegehalts die hygroskopische Ausgleichsfeuchte - siehe Tabelle 4 - zur Beschreibung des Feuchtezustandes im Baustoff zu verwenden /19/. Für ein solches Vorgehen scheint die Beobachtung zu sprechen, daß - baustoffunabhängig - ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt am Gebäude und Sorption besteht, siehe Bild 4. Dabei muß man allerdings voraussetzen, daß die Außenwände praktisch keine Feuchte bei Beregnung aufnehmen. Insofern könnte man bei einem Verzicht auf die Feuchtebestimmung über den Wandquerschnitt leicht zu dem Fehlschluß gelangen, Außenwände seien baupraktisch trocken (was gemäß Anlage 1 u.U. nur auf die innere Zone zutrifft) und besäßen demgemäß einen dem Praktischen Feuchtegehalt entsprechenden Wärmeschutz.

Tabelle 4: Hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte nach verschiedenen Quellen

Baustoff	rel. Luftfeuchte in %			
	60	70	80	90
<u>Gasbeton</u> , nach				
Wissmann /3/, $\rho = ?$	2	3	4 - 5	-
Künzel /19/*, $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$	1,8	2,2	3	5
Künzel /26/, $\rho \approx 430...730 \text{ kg/m}^3$	-	-	1,8...3,5	-
Künzel /28/, $\rho = 400...760 \text{ kg/m}^3$	0,85...2,1	0,95...2,5	1,3...3,0	2,3...3,8
<u>Ziegelscherben</u> , nach				
Wissmann, Haller, Cammerer /4/	0,2...(1)	0,6	-	0,2...1,0
Künzel /19/*, $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3, \mu = 15$	0,25	0,28	0,3	0,35
Künzel /26/, $\rho \approx 1050...1550 \text{ kg/m}^3$	-	-	0,4...0,65	-
<u>Kalksandstein</u>				
Wissmann, Haller, Cammerer /4/	2...9	3...9	-	6...12
Künzel /19/ *	1,7...3,5	1,8...3,8	2,4...5,5	6...10
<u>Putze</u> , nach /3/				
Zementmörtel 1:3	6...7	7...9	9...12	-
Kalkzementmörtel 1:2:9	5	7	11	-
Kalkmörtel 1:3	2	2,5	4	-

*) Meßwerte für Desorption

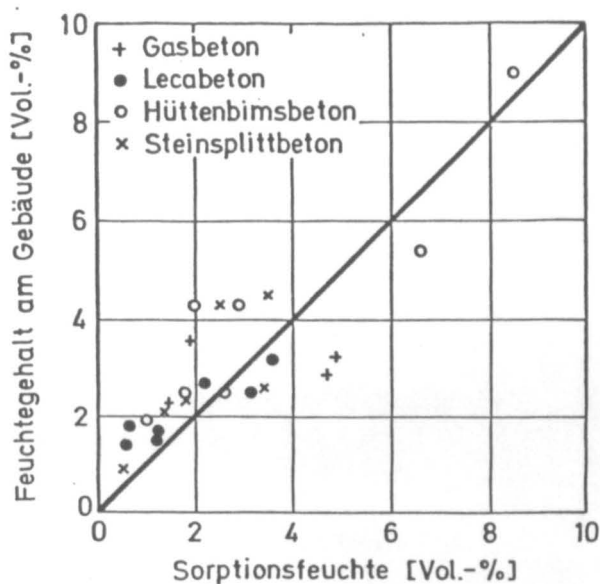


Bild 4: aus /19/

Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt von Außenwänden aus Leichtbetonen und Steinsplittbeton in der Praxis und der Sorptionsfeuchte bei 75% r.F. (ermittelt bei Absorption) nach J. Lang.

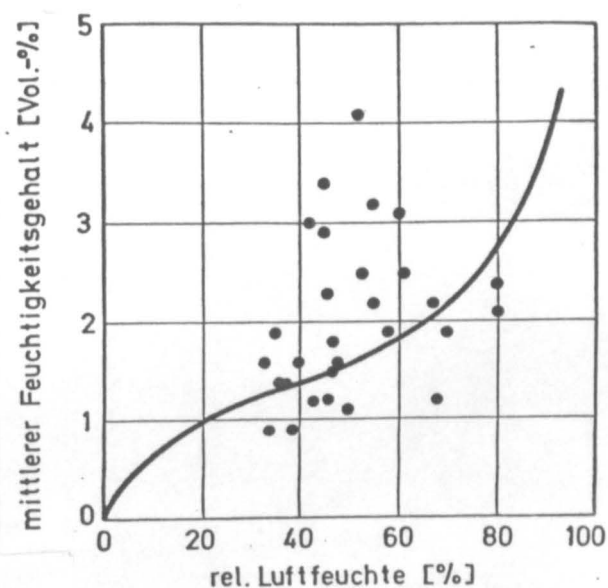


Bild 5: aus /19/

Zusammenhang zwischen dem mittleren Feuchtegehalt des Gasbetons von nicht belüfteten Dächern und der relativen Raumluftheuchte im angrenzenden Raum (Meßpunkte). Die eingezeichnete Sorptionsisotherme gilt für Gasbeton bei Umgebungstemperaturen zwischen 5°C und 50°C, ermittelt aus verschiedenen Angaben in der Fachliteratur.

Bild 5 zeigt aber, welche Streuung des mittleren Feuchtegehalts allein bei Gasbeton bei 50 % rel. Raumluftfeuchte vorhanden ist, d.h. genauer bei Gasbetondächern, also außenseitig oberflächenwasserdichten Bauteilen. Ohne Luftwechsel in den durch die Bauteiloberfläche abgeschlossenen Räumen hätten sich aufgrund der Sorptionsisotherme für Gasbeton Werte für die rel. Luftfeuchte zwischen 20 % und 90 % einstellen müssen.

Hieran zeigt sich, daß bei der Interpretation von Sorptionsisothermen in der Literatur eine einseitige Betrachtungsweise vorherrscht, derart daß die Blickrichtung immer nur von der rel. Raumfeuchte (Ursache) auf die volumenbezogene Feuchte im Baustoff (Wirkung) erfolgt.

Besonders im Hinblick auf die Austrocknung von Neubauten ist die entgegengesetzte Betrachtungsweise von Bedeutung; nämlich die Frage, welche Luftfeuchte stellt sich - unter Berücksichtigung des Verhältnisses von feuchter Bauteiloberfläche zu Raumvolumen und realer Luftwechselzahlen - in einem Raum ein, wenn die Baufeuchte höher als die Gleichgewichtsfeuchte ist.

Beispielsweise entnimmt man aus Bild 6, vgl. /19/, daß sich in Kalksandstein mit den angegebenen Eigenschaften bei 60 % rel. Luftfeuchte im Raum durch Absorption im Baustoff eine Feuchte von etwa 1,5 Vol.-% einstellt, jedoch ist gleichermaßen zu entnehmen, daß bei 8 Vol.-% Baufeuchte durch Desorption sich im Raum eine rel. Luftfeuchte von 85 % einstellen könnte - unter den Voraussetzungen: kein Luftwechsel, keine Absorption durch andere, trockene Bauteile und Einrichtungsgegenstände.

Dabei ist zu bedenken, daß eine 30 cm dicke Wand aus Kalksandsteinmauerwerk der Rohdichte 1400 kg/m^3 bei 8 Vol.-% Baufeuchte

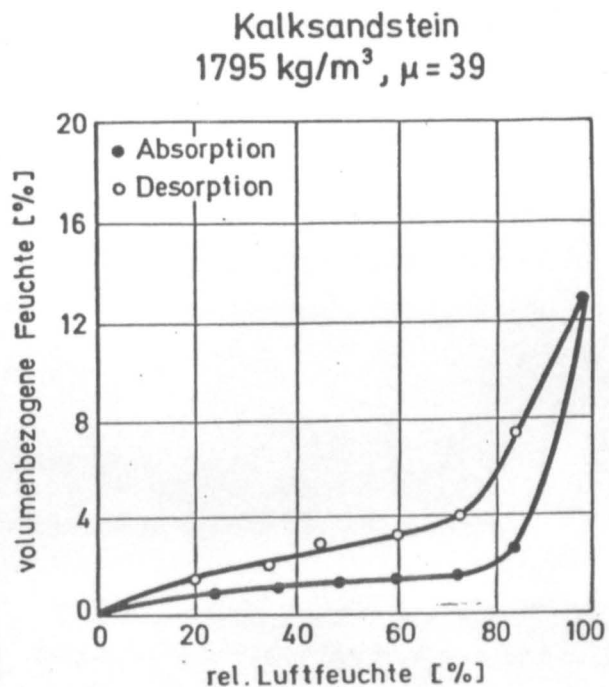


Bild 6:

aus /19/

Volumenbezogener Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchte bei Absorption und Desorption eines Kalksandsteins, Rohdichte 1795 kg/m^3 , Lufttemperatur 20°C .

24 kg Wasser je m² Wandfläche enthält, bei 1,5 Vol.-% hingegen nur 4,5 kg/m². Ordnet man 1 m² Außenwandfläche 5 m³ Raumvolumen (Raumtiefe 5 m) zu und unterstellt beispielsweise, daß - bei 20 °C Raumtemperatur - die Luft höchstens um 10 % zusätzlich mit Feuchtigkeit beladen werden darf, wenn Feuchteschäden vermieden werden sollen, also um 1,73 g/m³, dann würde eine gleichmäßig ablaufende Entfeuchtung bei stündlich 0,5 fachem Luftwechsel

$$t_A = \frac{19500 \text{ g/m}^2}{5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot 0,87 \text{ g/m}^3 \text{h}} = 4483 \text{ Stunden} \hat{=} 188 \text{ Tage}$$

dauern.

Mit der hier angeschnittenen Fragestellung haben sich Erhorn und Gertis /27/ aus einem etwas anderen Blickwinkel befaßt, nämlich mit der Frage, wie groß der Mindestluftwechsel zur Verhütung von Feuchteschäden sein muß. Sie berechnen zunächst die rel. Luftfeuchte φ_i , die sich im Gleichgewicht im Raum einstellt, unter Berücksichtigung von Feuchteproduktion im Raum \dot{m}_{Raum} , Luftwechsel n_L und Raumvolumen V sowie in Abhängigkeit von absoluter Temperatur T , Dampfdruck p_s und rel. Feuchte der Außenluft φ_a :

$$\varphi_i = \left(\frac{R \cdot T}{p_s} \right)_i \left[\frac{(\varphi p_s)_a}{RT_i} + \Delta c \right] \quad (1)$$

- Wasserdampfkonstante $R = 0,4615 \text{ kJ/kgK}$

- bezogene Feuchteproduktion $\Delta c = \frac{\dot{m}_{\text{Raum}}}{V \cdot n_L} \text{ g/m}^3$

Diese Gleichung (1) könnte durch Elimination von p durch die in DIN 4108 Teil 5 angegebenen Ausdrücke allein von der Temperatur abhängig gemacht, jedoch kaum vereinfacht werden. Für φ_a führen Erhorn und Gertis ein:

$$\varphi_a = 78,3 \% - 0,167 \vartheta_a \frac{\%}{^\circ\text{C}}.$$

Mit der normierten Taupunkt-Temperatur

$$\vartheta = \frac{\vartheta_s - \vartheta_a}{\vartheta_i - \vartheta_a} \text{ und dem Zahlenwert } \vartheta = 0,63 \text{ für Raumkanten,}$$

können die Autoren zeigen, daß bei Feuchtebeladung Δc von 6 g Wasser je m³ Raumluft die Bedingungen für die Entstehung von Feuchteschäden nicht nur im Winter - bei Temperaturen um -15 °C -, sondern wie aus der Praxis hinreichend bekannt /20/, auch in den Jahresübergangszeiten Frühjahr und Herbst

bei Außentemperaturen oberhalb von etwa 13 °C auftreten können. Dabei wird besonders darauf aufmerksam gemacht, daß für die Gefahr der Tauwasserbildung in der warmen Jahreszeit die Wärmedämmung der Außenbauteile ohne Bedeutung, stattdessen aber der Luftwechsel entscheidend ist.

Gemäß $\Delta c = \frac{\dot{m}}{V \cdot n_L} \leq 6 \text{ g/m}^3$ müssen sich zur sicheren Vermeidung von Feuchteschäden Feuchteabgabe an den Raum \dot{m} und Luftwechselzahl n_L stets im gleichen Maß verändern - sofern \dot{m} wächst.

In Bild 7 ist die zulässige bezogene Feuchteproduktion Δc dargestellt, für die eine normierte Taupunkt-Temperatur von $\theta = 0,63$ nicht überschritten wird, und in Bild 8 der Zusammenhang zwischen Luftwechsel und Feuchteproduktion in Abhängigkeit von Volumen und zulässiger Grenzkonzentration.

Danach beträgt für die kritische Feuchteproduktion von $\Delta c \leq 6 \text{ g/m}^3$ die minimal stündlich zu verdunstende Wasserdampfmasse $\dot{m} \leq 6 V n_L$. Bei normalen Wohnräumen variiert das Raumvolumen zwischen 12 und 36 m³. Damit hängt die erlaubte Feuchteproduktion nur noch vom Luftwechsel ab und beträgt

$$\dot{m} \leq 72 n_L \dots 216 n_L \text{ in g/h.}$$

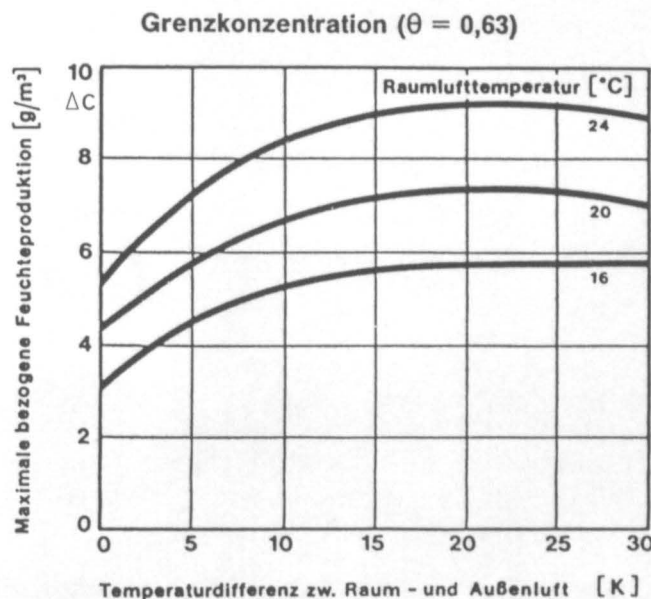


Bild 7. Darstellung der maximalen spezifischen Feuchteproduktionen (Grenzkonzentration), bei denen noch keine Tauwasserbildung auftritt, in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft bei verschiedenen Innenlufttemperaturen für eine Ecke mit Mindestwärmeschutz. Die Grenzkonzentration nimmt mit ansteigenden Außenlufttemperaturen ab, woraus sich ein verstärkter Luftwechsel ergibt.

aus /27/

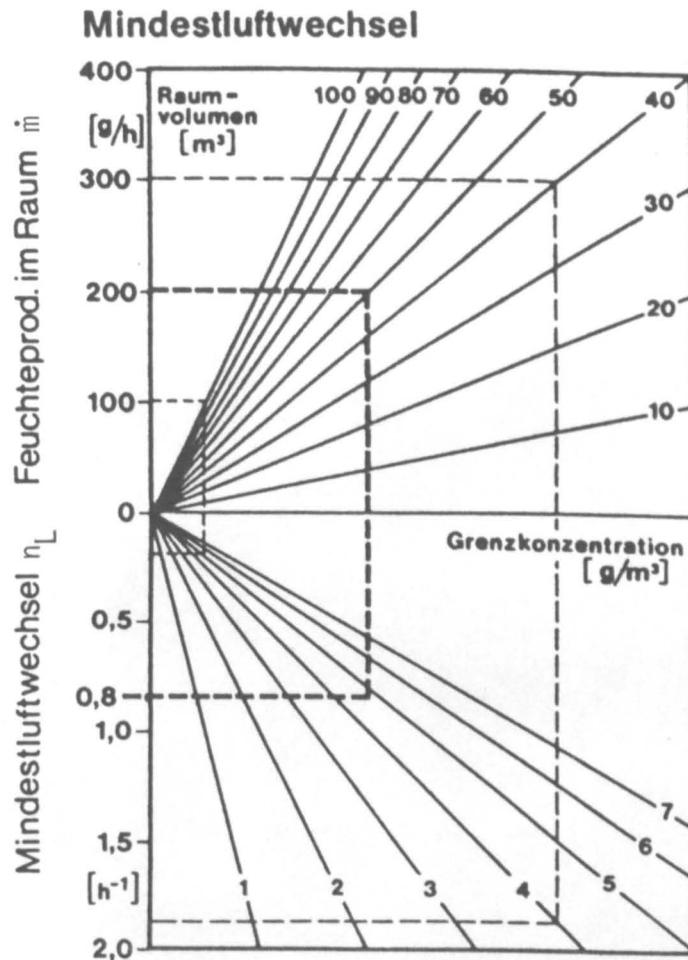


Bild 8. Nomogramm zur Ermittlung des Mindestluftwechsels bei vorgegebener Grenzkonzentration. Für mittlere Wohnverhältnisse ergibt sich der eingezeichnete Verlauf und damit ein Mindestluftwechsel von ca. $0,8 \text{ h}^{-1}$.

Wenngleich Messungen des üblicherweise vorhandenen Luftwechsels zu Werten zwischen "unter $0,2 \text{ h}^{-1}$ bis hin zu mehr als $2,0 \text{ h}^{-1}$ " geführt haben /27/, so läßt sich doch vermuten, daß in Schadensfällen eher der untere Bereich vorgelegen hat.

Als obere Grenze für die mittlere tägliche Luftwechselzahl ist aufgrund eigener Erfahrungen in Schadensfällen der in DIN 4701 zugrunde gelegte Wert $\overline{n}_L = 0,5$ anzusetzen, entsprechend etwa

1 x 0,5 oder 2 x 0,25 Stunden Lüften mit geöffnetem Flügel $n_L = 10$: $n_{L0,5} = 5 \text{ h}^{-1}$

23,5 Stunden geschlossene Fenster

$n_L = 0,3$: $n_{L23,5} = 7,05 \text{ h}^{-1}$

$n_{L24} = 12,05 \text{ h}^{-1}$

oder $\overline{n}_L = 0,5 \text{ h}^{-1}$ im Mittel pro Tag.

Damit dürfte, um Schadensfreiheit zu garantieren, in den Räumen von o.g. Größe die Feuchteproduktion aller Feuchtequellen zusammen - pro Raum - maximal 36 bzw. 108 g/h betragen oder - wegen des zeitlich unterschiedlichen Luftwechsels - 864 bzw. 2592 g/Tag. Dabei ist zu beachten, daß das Lüften von Wohnungen nicht allein dem Luftaustausch mit der Außenluft dient, sondern auch dem Feuchteausgleich zwischen den einzelnen Räumen einer Wohnung. Die bekannte Problematik des "Temperierens" von Schlafräumen sei hier nur beiläufig erwähnt.

Beispiel: Schlafräum 16 m²

Eckraum: Außenwandfläche 28 m²

8 Stunden belegt mit 2 Personen:

Feuchteproduktion: $2 \times 8 \text{ h} \times 60 \text{ g/h} = 960 \text{ g/Nutzung}$

Zulässige Feuchteproduktion: 1152 g/Tag

Rechnerische Reserve, z.B. für austrocknende Feuchte: 192 g/Tag

192 g/Tag = 6,9 g/m²Tag entsprechend 0,29 g/m²h Außenwandfläche.

Also sind 0,3 g/m²h diejenige Trocknungsrate, die bei Bezug/Nutzung gewährleistet sein müßte unter der Voraussetzung, daß die Raumtemperatur mindestens 16 °C beträgt, alle Innenwände bereits ausgetrocknet und sonstige Feuchtequellen (Pflanzen) nicht vorhanden sind.

Im Hinblick auf die hier untersuchte Fragestellung, zu welchem Zeitpunkt ein Bauteil so weit ausgetrocknet ist, daß durch die mit der Nutzung verbundene Feuchtezufuhr keine Feuchteschäden mehr zu erwarten sind, hat Breyer /24/ in neuester Zeit eine pragmatische Lösung angeboten. Er definiert diesen Zeitpunkt durch die täglich je m² Wandfläche in den Raum abgegebene Feuchte, die seiner Meinung nach nicht größer sein dürfte als 5 g/m²Tag, in guter Übereinstimmung mit o.g. Beispiel. Somit müßte man - bei einer Beurteilung im Schadensfall und Verdacht auf erhöhte Neubaufeuchte - aus dem Anstieg der rel. Feuchte nach gründlichem Lüften, Verzicht auf Nutzung und Versiegeln von Fenstern und Türen die Feuchteabgabe der Außenbauteile ermitteln, siehe hier Abschnitt 3.3.3.

Abschließend soll aber noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die entscheidende Arbeit der letzten Jahre zum Verständnis von Feuchtetransport

und Feuchtespeicherung von Kießl /22/ stammt, der nach sorgfältigen Vorarbeiten /18/ den kapillaren und dampfförmigen Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen einer quantitativen Lösung zugeführt hat, siehe hier als Beispiel Bild 9.

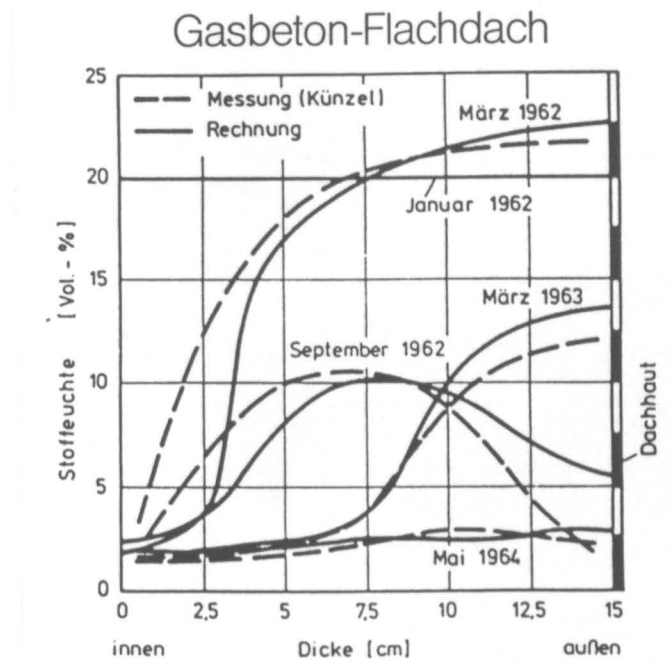


Bild 9: Gemessene und berechnete Verteilungen des Feuchtegehaltes in einem Gasbeton-Flachdach zu verschiedenen Zeitpunkten, nach /22/.

3. Durchführung der Untersuchungen

3.1 Versuchshaus

Das Versuchshaus konnte ab Mitte April 1984 durch das Entgegenkommen der zuständigen Behörden auf einem bundeseigenen Gelände errichtet werden. Vor einem hohen Garagengebäude mit 40 cm dickem Hochlochziegelmauerwerk der Giebelwand wurde es - mit der Versuchswand nach Westen - als eingeschossiger Bau ausgeführt, siehe Anlage 2.

Die 30 cm dicke, rd. 2 m hohe Außenwand aus den zu untersuchenden Mauerwerksarten wurde in vier Abschnitten von 2 m, getrennt durch 24 cm breite, 39 cm dicke Stützpfeiler aus Vollziegelmauerwerk auf einem frostsicheren Betonfundament mit Feuchtigkeitsabdichtung errichtet. Folgende Baustoffe fanden Verwendung:

- Gasbeton-Blocksteine G2 - 0,5, dünnfugig vermauert,
- Leichthochlochziegel HLzA 6 - 0,9 ("Poroton"), im folgenden nicht normgemäß mit LHLz bezeichnet,
- Hochlochziegel HLzA 12 - 1,2,
- Kalksand-Lochsteine KSL 12 - 1,6.

Der Mauermörtel entsprach Mörtelgruppe II nach DIN 1053, Tabelle 6, Zeile 6.

Die äußere Bekleidung/Verkleidung der Wände wurde abschnittsweise, in 2 m Breite, variiert:

- Vor Gasbeton-, Leichthochloch- bzw. Hochlochziegel-Mauerwerk:
 - 2,5 cm Kalkzementputz, Mörtelgruppe PII b gemäß DIN 18 550 oder
 - 11,5 cm Vormauerziegel mit Luftschicht nach DIN 1053, nicht belüftet.

Verblendmauerwerk mit Luftschicht wurde gewählt, um durchschlagende Feuchte ausschließen zu können; die Luft wurde aber nicht belüftet, um den ungünstigsten Fall der Austrocknung nach außen zu simulieren.

- Vor Kalksandlochstein-Mauerwerk:
 - 4 cm Schaumkunststoffplatten mit 1 cm ISPO-Putz, bewehrt, oder
 - 4 cm Perlite-Schüttung mit 11,5 cm Vormauerziegel.

Diese Konstruktion wurde gewählt, um einen ausreichenden, etwa mit der Gasbetonkonstruktion vergleichbaren Wärmeschutz zu gewährleisten.

Innen waren alle Wände 1,5 cm dick mit Kalkmörtel verputzt.

Somit standen acht Wandabschnitte mit unterschiedlichem Aufbau von etwa 1,00 m Breite und 2,00 m Höhe zur Untersuchung des Austrocknungsverhaltens zur Verfügung.

Das 30 cm dicke Mauerwerk im Anschluß an die Versuchswand sowie das 24 cm dicke stirnseitige Mauerwerk des Versuchshauses wurde aus Hochlochziegeln erstellt und beidseitig, wie vorstehend angegeben, geputzt. An der Stirnseite des Versuchshauses befand sich der Eingang mit einer Stahltür, die eine Schwelle und eine dreiseitig umlaufende Dichtung besaß.

Als Dach wurde eine Holzkonstruktion mit Balken von 6/12 cm Querschnitt, oberseits auf der Holzschalung (2,4/12 cm Holzdielen) mit zweilagiger Abdichtung aus Bitumenbahnen (V13 und Bitumenschweißbahn V 60 S 4), unterseits mit Wärmedämmung aus 60 mm dicken Platten aus PS-Hartschaum, ausgeführt. Der Dachüberstand betrug im Bereich des Verblendmauerwerks 20 cm, bei den geputzten Wänden 36 cm.

Der Fußboden bestand aus einer Schlacke-/Sandschüttung, zweilagig mit 0,2 mm dicken PE-Folien abgedeckt, und 22 mm dicken Holzspanplatten, besaß also keine zusätzliche Wärmedämmung.

Das 44 m³ große Versuchshaus mit 18,3 m² Grundfläche war am 25.05.1984 als Rohbau-Mauerwerk fertiggestellt; danach wurden starke Regenfälle abgewartet, ehe Mitte Juni das Dach aufgebracht wurde, anschließend wurden die Wände geputzt. Das Versuchshaus wurde am 11.07.1984 mit den ersten Messungen in Betrieb genommen.

Angaben zur Rohdichte der Baustoffe sowie zu rechnerischem Wärmeschutz und Tauwasserausfall nach DIN 4108 sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die Reihenfolge der Auflistung entspricht der Anordnung im Versuchshaus, siehe Anlage 2.

Tabelle 5: Kennwerte der untersuchten Konstruktion

Konstruktion		Trockenrohddichte der Mauersteine und der Steinscherben in kg/m ³	Wärmedurchlaß- widerstand $\frac{1}{\Lambda}$ in m ² K/W	Wärmedurchgangs- koeffizient k in W/m ² K	Tauwasser- masse W _T in kg/m ²	Verdunstende Wassermasse W _V in kg/m ²
Baustoff des Mauerwerks	Art der Bekleidung/ Verkleidung					
Gasbeton	Putz	$\rho_{tr} = \rho_s = 416$	1,34	0,66	0,404	1,161
	Mauerwerk		1,71	0,53	0,349	0,886
Leicht- Hochlochziegel	Mauerwerk	$\rho_{tr} = 886$	1,06	0,81	0,270	0,886
	Putz	$\rho_s = 1.572$	0,75	1,09	0,362	1,154
Hochlochziegel	Putz	$\rho_{tr} = 992$	0,70	1,15	0,356	1,154
	Mauerwerk	$\rho_s = 1.876$	1,02	0,84	0,260	0,886
Kalksand- lochstein	Mauerwerk mit Kerndämmung	$\rho_{tr} = 1.450$	1,29	0,68	0,019	0,657
	Wärmedämm- Verbundsystem	$\rho_s = 1.815$	1,40	0,64	0,036	1,342

Wie ersichtlich ist, war die Rohdichte der Leichthochlochziegel und Hochlochziegel etwa gleich, nicht jedoch ihre Scherbenrohddichte, die sich bei den porosierten Ziegeln leider höher als zunächst beabsichtigt ergab.

Die Erfassung der Austrocknung des Mauerwerks sollte ursprünglich durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit im Mauermörtel erfolgen /9/. Hierzu wurden im Institut an kleinen Pfeilern orientierende Messungen durchgeführt und aufgrund der gewonnenen Ergebnisse bei Errichtung des Versuchshauses in jeder der acht Wandkonstruktionen an drei Stellen, in 55 cm, 105 cm und 155 cm Höhe über dem Fußboden, isolierte Cu-Drahtelektroden in den Mauermörtel der entsprechenden Lagerfugen eingebettet. Dabei wurden zur Ermittlung des Feuchteprofils über den Wandquerschnitt an jedem der 24 Meßpunkte neu Elektroden - stufenförmig versetzt - so eingelassen, daß zwischen den Wandoberflächen und den ersten Elektroden ebenso wie zwischen den einzelnen Elektroden untereinander ein Abstand von 3 cm vorhanden war.

Zur zeitlichen Erfassung der Austrocknung - in Abhängigkeit von der Änderung der inneren und äußeren Klimaten - sollte wöchentlich der Widerstand bzw. die elektrische Leitfähigkeit im Umfeld der Elektroden als Spannungsabfall an einem bekannten Vorwiderstand gemessen werden. Hierzu wurde Wechselspannung (Frequenz 30 Hz) verwendet, um Polarisationserscheinungen zu vermeiden.

Diese für die Durchführung des Forschungsvorhabens wichtigen Messungen mußten jedoch im Versuchshaus wegen unlösbarer Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Erdung der zur Widerstandsbestimmung verwendeten Geräte abgebrochen werden.

Das Versuchshaus wurde im Winterhalbjahr elektrisch beheizt: Zur Begrenzung der Heizkosten ($\vartheta_i \leq 21^\circ\text{C}$) wurde ein thermostatgesteuerter 2000 W-Konvektor mit Luftumwälzung eingesetzt.

Die Belüftung erfolgte während der gesamten Versuchsdauer über die an das Versuchshaus anschließende, unbeheizte Großgarage (Volumen ca. 5000 m³): Durch die Trennwand zur Garage wurden vier Löcher von 200 mm Durchmesser gebohrt; diese Löcher lagen paarweise übereinander in ca. 1,00 m vertikalem und ca. 2,00 m horizontalem Abstand. In eine der oberen Öffnungen

wurde ein Ventilator mit einem Leerlauf-Volumenstrom von $285 \text{ m}^3/\text{h}$ eingesetzt und damit die Raumluft gegen die Luft aus der Garage ausgetauscht. Über die Dauer des Vorhabens wurde in unterschiedlicher Weise das Versuchshaus belüftet, siehe unten.

Nach dem Erreichen einer rel. Feuchte von 70 % im Versuchshaus wurden zur Heizenergieeinsparung zwei der vier Bohrungen in der Giebelwand der Großgarage mit Mineralwolle abgedichtet.

Ab Januar 1986 wurde zusätzlich ein Luftentfeuchter aufgestellt, sowohl zur Gewährleistung einer etwa konstanten Luftfeuchte im Versuchshaus als auch zur Ermittlung der Entfeuchtungsmenge. Dessen Entfeuchtungsleistung betrug bei einem Luftdurchsatz von $500 \text{ m}^3/\text{h}$ maximal $12,6 \text{ l/Tag}$, d.h. etwa 1 ml je m^3 Luftdurchsatz.

Temperatur und rel. Feuchte wurden im Versuchshaus nahezu ständig registriert.

3.2 Meßwerte und zeitlicher Ablauf der Untersuchungen

3.2.1 Raumklima

Auf das Klima im Versuchshaus wurde gemäß folgender Aufstellung durch Lüftung, Entfeuchtung und Heizung Einfluß genommen:

- ab 03.08.1984: ständiges Lüften, hygrostatgesteuert, solange $\varphi \geq 70 \%$ - ohne Heizung
- ab 06.10.1984: Lüften, wie vorstehend - mit Heizung, $\vartheta \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$,
- ab 08.05.1985: ohne Lüften - ohne Heizung,
- ab 23.06.1985: "simuliertes Lüften", $\varphi \leq 30 \%$, über Zeitschaltuhr 7.00/21.00 Uhr je 15 Minuten - ohne Heizung
- ab 08.11.1985: Lüften wie vor, mit Heizung, $\vartheta \leq 15 \text{ }^\circ\text{C}$,
- 30.01.1986: Lüften wie vorstehend, zusätzlich Entfeuchtung, $\varphi \approx 60 \%$ - mit Heizung,
- ab 19.03.1986: Lüften und Entfeuchtung wie vorstehend - ohne Heizung,
- 26.06.1986: Ende der Untersuchungen.

Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit wurden - mit Ausnahme der Herbst-Ferienzeit 1986 - ständig mit Hygrothermografen registriert. In Anlage 3 sind die Extremwerte, monatlich bzw. für die o.g. Meßabschnitte, aufgetragen. Wie daraus ersichtlich ist, war es mit der gewählten Lüftung und Heizung nicht möglich, die Temperatur im Meßhaus konstant zu halten; insbesondere nicht bei extrem niedrigen Außentemperaturen. Das Raumklima entspricht jedoch im Durchschnitt bewohnten Räumen, insbesondere Schlaf-räumen an der Grenze zum Tauwasserausfall.

Die rel. Luftfeuchte, nach Errichtung des Versuchshauses bei 100 % liegend, nahm während der ersten sechs Monate ständig ab, bis auf 60 %. Der Wiederanstieg im Sommer des folgenden Jahres beruht bereits auf der Außen-feuchte. Im Frühjahr des letzten Untersuchungshalbjahres konnte die Feuchte annähernd konstant auf 60 % gehalten werden, dabei stieg die Entfeuchtungs-menge von März bis Juni 1986 von 27 auf 1533 ml/Tag an.

Die in Anlage 3 herausgehobenen Daten sind die Termine der Bohrkernent-nahme zur gravimetrischen Bestimmung des Feuchtegehalts.

3.2.2 Außenklima

Aus Sicherheitsgründen war es am Standort des Meßhauses nicht möglich, eine Wetterstation zu errichten. Das Außenklima wurde deshalb den Boden-wettermeldungen des Deutschen Wetterdienstes für die Station Braunschweig-Völkenrode entnommen. Dementsprechend war es auch nicht vorgesehen, den Schlagregen quantitativ zu erfassen.

Die monatlichen Extremwerte für Temperatur und rel. Feuchte sind ebenfalls in Anlage 3 dargestellt. Bemerkenswert ist hierzu lediglich, daß wie all-gemein bekannt, die Sommer 1984 und 1985 sowie die Winter 1984/85 und 1985/86 zu kalt waren; in beiden Jahren gab es keinen Sommertag mit $\vartheta > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, dafür reichlich Eistage. Die rel. Feuchte lag praktisch immer bei 75 bis 80 %.

Die Schlagregenmenge R_S wurde unter Beachtung des von Lacy gefundenen Zusammenhanges $R_S = 0,2 u R_N$ für Normalregenmenge R_N und Windgeschwindig-keit u anhand der amtlichen Wettermeldungen abgeschätzt.

Künzel und Schwarz /14/ stellten bei einer Überprüfung dieser Beziehung fest, daß die Schlagregenbeanspruchung eines Gebäudes zwar von der Art der Umströmung abhängt und somit in Abhängigkeit von Gebäudehöhe und Standort erhebliche Streuungen aufweist, bestätigen jedoch zugleich die o.g. Beziehung für eine freie Windströmung.

Eine rechnerische Abschätzung der Schlagregenmenge wurde für ausreichend gehalten; denn im Hinblick auf die Austrocknung von Mauerwerk geht es nicht um die Angabe eines eng tolerierten Zahlenwertes, sondern um die Feststellung von Ereignissen, die mit hinreichender Sicherheit eine Austrocknung nach außen verhindert haben könnten. Dies ist sowohl an Tagen ohne Regen wie auch an Tagen mit wenig Regen und ohne Wind nicht der Fall, hingegen sind - windstille - Tage mit starken Regenfällen recht selten.

In die rechnerische Abschätzung mußte auch die Windrichtung α einbezogen werden; deshalb wurde anhand der amtlichen Wetterberichte als Schlagregenmenge die Größe $R_{cal} = 0,2 uR_N \sin \alpha$ für $180^\circ(\text{süd}) \leq \alpha \leq 360^\circ(\text{nord})$ ausgewertet. Das Ergebnis ist mit in Anlage 3 als Dekadensumme über die Versuchsdauer dargestellt.

3.2.3 Gravimetrische Feuchtebestimmung

Im Abstand von rd. 3 Monaten wurden aus jedem Wandabschnitt des Versuchshauses Bohrkerne von ca. 50 mm Durchmesser von innen entnommen; diese wurden trocken über eine Tiefe von ungefähr 250 mm in Abschnitten von 50 mm Länge erbohrt, sofort luftdicht in Kunststoffbeuteln verwahrt und im Institut bei 105 °C getrocknet. Die Entnahmestellen wurden so gewählt, daß die Proben keinen Lagerfugenmörtel enthielten.

Die einzelnen Bohrlöcher wurden unmittelbar nach der Entnahme der Bohrkerne mit PU-Ortschaum verschlossen und neu verputzt. Naturgemäß konnte der Feuchtegehalt des Mauerwerks an jeder Entnahmestelle nur einmal ermittelt werden; die Bohrungen für die folgenden Entnahmen wurden zunächst in anderen Höhen, später in der Umgebung der ersten Kerne angelegt, jedoch mindestens 10 cm von den Berandungen der früheren Bohrlöcher entfernt. Bei der Beurteilung der nachfolgend angeführten Ergebnisse sind hierdurch bedingte Einflüsse zu beachten.

Der Feuchtegehalt im Mauerwerk wurde während der sich über zwei Jahre erstreckenden Untersuchungsdauer achtmal gravimetrisch bestimmt, und zwar zu folgenden Terminen:

<u>Datum</u>	<u>Alter des Mauerwerks^{*)}</u>
<u>17.08.1984</u>	60 Tage
<u>12.11.1984</u>	147 Tage
<u>13.02.1985</u>	240 Tage
<u>20.05.1985</u>	336 Tage
<u>12.08.1985</u>	420 Tage
<u>12.11.1985</u>	512 Tage
<u>16.02.1986</u>	608 Tage
<u>29.05.1986</u>	710 Tage

^{*)} Bezogen auf den Einbau des Daches, d.h. die Herstellung des Raumabschlusses. Zu diesem Zeitpunkt war das Rohbau-Mauerwerk - noch ohne Außen- und Innenputz - 84 Tage alt.

Die ermittelten Feuchtegehalte sind in Tabelle 6 für den Innenputz und in Tabelle 7 für die einzelnen Konstruktionen als Mittelwerte über die Bohrtiefe zusammengestellt; dabei ist jeweils der gemessene massebezogene Feuchtegehalt u_m sowie der sich unter Bezug auf die Scherbenrohddichte gemäß Tabelle 5 ergebende volumetrische Feuchtegehalt u_v angegeben. Für den Kalkinnenputz wurde eine Rohddichte von 1600 kg/m^3 angesetzt.

In den Anlagen 4 und 5 sind die mittleren Feuchtegehalte des Mauerwerks in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen und in den Anlagen 6 bis 9 die Feuchteverteilung über den Wandquerschnitt für die vier in o.g. Auflistung unterstrichenen Termine.

Insgesamt lassen sich aus diesen Meßwerten folgende Untersuchungsergebnisse entnehmen:

Austrocknung des Putzes:

Der Feuchtegehalt des Putzes war bereits bei der ersten Probenahme rel. gering; zwischen 3,6 und 2,0 Massen-% - abgesehen von zwei überhöhten Anfangswerten bei den Konstruktionen Gasbeton mit Außenputz und Hochlochziegel mit Verblendmauerwerk, wobei der Wert für den Putz auf Gasbeton unrealistisch

Tabelle 6: Austrocknung des Innenputzes ($\rho_{tr} = 1600 \text{ kg/m}^3$)

Datum / Alter seit Erstellung	Entnahme- stelle über OKF in cm	Größe	Prozentualer Feuchtegehalt u_m und u_v des Innenputzes auf Mauerwerk / Bekleidung aus								Einheit
			Gasbeton		Leicht- Hochlochziegel		Hochlochziegel		Kalksand- Lochstein		
			Putz	VMz	VMz	Putz	Putz	VMz	VMz	Putz	
17.08.1984 60 Tage	173	u_m u_v	13,9 22,2	3,6 5,8	2,0 3,2	2,0 3,2	2,9 4,7	6,9 11,1	2,1 3,3	2,2 3,5	Massen-% Volumen-%
12.11.1984 147 Tage	134	u_m u_v	2,7 4,3	2,4 4,0	2,0 3,1	2,5 4,0	2,0 3,2	4,5 7,2	1,2 1,9	1,3 2,1	Massen-% Volumen-%
13.02.1985 240 Tage	110	u_m u_v	2,3 2,5	1,9 3,0	1,2 1,9	1,1 1,7	1,8 2,9	1,5 2,9	1,8 2,8	1,2 1,9	Massen-% Volumen-%
20.05.1985 336 Tage	84	u_m u_v	1,7 2,7	1,9 3,0	1,0 1,6	1,2 1,9	1,3 2,0	1,4 2,2	1,3 2,1	1,2 1,9	Massen-% Volumen-%
12.08.1985 420 Tage	59	u_m u_v	1,5 2,4	1,8 2,9	1,3 2,1	1,8 2,8	1,6 2,6	1,6 2,5	1,5 2,4	1,4 2,3	Massen-% Volumen-%
12.11.1985 512 Tage	37	u_m u_v	1,5 2,4	2,5 4,0	1,5 2,4	1,5 2,4	1,7 2,7	1,9 3,1	1,3 2,2	1,4 2,2	Massen-% Volumen-%
16.02.1986 608 Tage	134	u_m u_v	1,6 2,6	1,7 2,7	1,2 2,0	1,3 2,0	1,4 2,2	1,2 1,9	1,4 2,2	1,6 2,5	Massen-% Volumen-%
29.05.1986 710 Tage	84	u_m u_v	1,3 2,1	1,5 2,4	0,9 1,4	1,1 1,8	1,4 2,2	1,2 1,9	1,1 1,8	1,1 1,7	Massen-% Volumen-%

Tabelle 7: Austrocknung des Mauerwerks (Mittelwert über die Entnahmetiefe)

Datum / Alter seit Erstellung	Entnahme- stelle über OKF in cm	Größe	Prozentualer Feuchtegehalt u_m und u_v des Mauerwerks mit verschiedenen Bekleidungen								Einheit
			Gasbeton		Leicht- Hochlochziegel		Hochlochziegel		Kalksand- Lochstein		
			Putz	VMz	VMz	Putz	Putz	VMz	VMz	Putz	
17.08.1984 60 Tage	173	u_m u_v	44,9 18,7	37,0 15,4	3,4 5,3	4,5 7,0	5,0 9,5	4,5 8,4	6,8 12,3	7,9 14,4	Massen-% Volumen-%
12.11.1984 147 Tage	134	u_m u_v	23,8 9,9	25,2 10,6	6,0 9,5	4,6 7,3	6,1 11,6	5,1 9,6	7,0 12,8	6,8 12,5	Massen-% Volumen-%
13.02.1985 240 Tage	110	u_m u_v	11,0 4,6	22,7 9,5	3,2 5,0	2,6 4,0	4,0 7,4	4,1 7,8	4,9 8,9	5,2 9,5	Massen-% Volumen-%
20.05.1985 336 Tage	84	u_m u_v	21,6 9,0	19,3 8,0	2,4 3,7	4,2 6,5	2,7 5,1	4,1 7,6	4,6 8,4	4,8 8,8	Massen-% Volumen-%
12.08.1985 420 Tage	59	u_m u_v	16,7 6,9	15,0 6,2	2,1 3,3	2,5 4,0	1,7 3,3	3,1 5,8	5,0 9,0	5,1 9,3	Massen-% Volumen-%
12.11.1985 512 Tage	37	u_m u_v	21,0 8,8	16,4 6,8	3,6 5,6	3,3 5,1	2,5 4,8	3,2 6,0	6,1 11,0	6,8 12,4	Massen-% Volumen-%
16.02.1986 608 Tage	134	u_m u_v	16,2 6,8	13,6 5,7	2,2 3,5	1,9 2,9	3,5 6,5	2,6 4,9	4,7 8,6	4,9 8,8	Massen-% Volumen-%
29.05.1986 710 Tage	84	u_m u_v	13,6 5,7	10,1 4,2	2,3 3,6	1,9 3,0	2,1 3,9	3,3 6,2	4,8 8,6	5,1 9,2	Massen-% Volumen-%

hoch erscheint. Die Feuchte nach zwei Jahren lag für alle acht Konstruktionen zwischen 0,9 und 1,5 Massen-% bzw. zwischen 1,4 und 2,4 Vol.-%, sie entsprach damit der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte.

Austrocknung des Mauerwerks:

Wie aus den Anlagen 4 und 5 hervorgeht, erfolgte die Austrocknung des Mauerwerks zwar nicht gleichmäßig, jedoch waren die Endwerte im wesentlichen Bereich bereits nach einem Jahr erreicht.

Bei den beiden Ziegelkonstruktionen und - andeutungsweise - bei einer KSL-Konstruktion lag der Feuchtegehalt im Spätherbst 1984 höher als bei der ersten Probenahme im Sommer 1984, trotz erheblich reduzierter Raumluftfeuchte.

Im Spätherbst 1985, nach 512 Tagen bzw. 1,4 Jahren, lag der Feuchtegehalt bei allen Konstruktionen mehr oder weniger deutlich über dem Feuchtegehalt des Spätsommers 1985; von diesem Zwischenanstieg abgesehen, verlief die Austrocknung nahezu monoton mit der Zeit.

Für die einzelnen Konstruktionen hat sich der Feuchtegehalt im Mauerwerk zwischen erster und letzter Messung in nachfolgend angegebener Größe verändert; angegeben sind die Mittelwerte für beide Konstruktionen \pm Abweichung für Putz/Verblendmauerwerk.

<u>Baustoff</u>	<u>Alter in Tagen</u>	<u>Feuchtegehalt in Vol.-%</u>	<u>Austrocknungs- rate in g/m²h</u>
Gasbeton	60	17 \pm 1,7	9,9 \pm 2,7
	710	5 \pm 0,7	1,56 \pm 0,23
Leichtlochziegel	60	6,1 \pm 0,9	-
	147	8,4 \pm 1,1	2,86 \pm 0,48
	710	3,3 \pm 0,3	\sim 0
Hochlochziegel	60	9 \pm 0,5	-
	147	10,6 \pm 1,0	2,07 \pm 0,73
	710	5 \pm 1,2	-
Kalksandstein	60	13,4 \pm 1	-
	147	12,7 \pm 0,2	3,61 \pm 0,49
	710	8,9 \pm 0,3	-

Somit war

- die Anfangsfeuchte im Gasbeton zwar am größten, dessen vorläufige Restfeuchte jedoch geringer als im KSL-Mauerwerk und etwa gleichgroß wie im HLz-Mauerwerk,
- die Anfangsfeuchte und die Restfeuchte im LHLz-Mauerwerk am geringsten,
- der Unterschied im Feuchtegehalt zwischen Konstruktionen mit Putz oder mit Verblendmauerwerk relativ unbedeutend: nach zwei Jahren zwischen 0,6 und 2,3 Vol.-% (zufällig bedingt). Lediglich beim Gasbeton-Mauerwerk mit Putz war - im gesamten letzten Beobachtungsjahr - der Feuchtegehalt ständig höher als im Gasbeton mit Verblendmauerwerk, was nicht mehr auf eine höhere Anfangsfeuchte zurückgeführt werden kann.

Der Praktische Feuchtegehalt nach DIN 4108/DIN 52 612 ist in keinem Falle erreicht! Eine Prognose aufgrund der zeitlichen Änderung des Feuchtegehalts erscheint kaum möglich, zumal sich auch im Herbst 1986 eine jahreszeitlich bedingte Zunahme eingestellt haben dürfte, die aber nicht auf die Einwirkung von Schlagregen zurückgeführt werden kann: Dafür fehlten im November 1985 sowohl die meteorologischen Voraussetzungen als auch deutliche Unterschiede im Feuchtegehalt der Konstruktionen mit Außenputz bzw. mit Verblendmauerwerk.

Lediglich bei den Gasbeton-Konstruktionen läßt sich erwarten, daß etwa nach einem weiteren halben Jahr (mit Verblendmauerwerk) bzw. nach einem Jahr (mit Putz) der Praktische Feuchtegehalt erreicht worden sein wird.

Die von Künzel in letzter Zeit wiederholt publizierte Gasbetonwandkonstruktion mit Putz, bei der der Feuchtegehalt in einer Zeitspanne von neun Jahren nicht unter 25 Vol.-% abgenommen hat, dürfte vermutlich auf einem mangelhaft ausgeführten Putz beruhen, vgl. Bild 3 und Anlage 4.

Bei den restlichen sechs Konstruktionen ist nicht erkennbar, daß bzw. wann unter den hier gewählten Versuchsbedingungen der Praktische Feuchtegehalt erreicht wird. In der Reihenfolge der Konstruktionen aus Leichthochlochziegeln, Hochlochziegeln und Kalksandlochsteinen liegen die gegenwärtig vorhandenen Überschreitungen des Praktischen Feuchtegehaltes bei 100 %, 200 % bzw. 60 %. Allerdings stehen die bisher vorgefundenen Werte - ins-

besondere für Kalksandstein - im Widerspruch auch zu den eigenen Erfahrungen an älteren Bauten mit Außenputz, also ohne Verblendmauerwerk oder Wärmedämmverbundsystem, und ohne fugendichte Fenster.

Da die relative Luftfeuchte im Versuchshaus während des letzten Halbjahres vor der letzten Bohrkernentnahme relativ eng bei 60 % lag, könnte man schließen, es handele sich bei dem Feuchtegehalt der Baustoffe um die hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte, diese ist jedoch deutlich geringer, siehe Abschnitt 3.3.1 und Tabelle 4.

In der Zeit zwischen März und Juni 1986 wurde die im Luftentfeuchter kondensierte Wassermenge in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Während dieser Zeit war der Feuchtegehalt der Außenluft stets kleiner als der der Raumluft im Versuchshaus.

Die Entfeuchtungsmenge lag zwischen 27 und 1533 ml/Tag, das sind 1,13 bis 63,9 ml/h oder etwa 0,026 bis 1,45 g/m³h. Bei einer Umrechnung auf die Außenwandfläche muß die gesamte Oberfläche des Versuchshauses Berücksichtigung finden, also ca. 8 m² Versuchswand zuzüglich 3,1 m² sonstiger Wandflächen - ohne Stahltür - und ohne Wandpfeiler, die bei dreiseitiger Luftumspülung als hinreichend ausgetrocknet angenommen werden. Somit ergibt sich eine rechnerische Austrocknungsrate zwischen 0,10 g/m²h und 5,76 g/m²h, durchaus in größenordnungsmäßiger Übereinstimmung mit o.g. Werten.

Der Anstieg der Entfeuchtung in der Zeit zwischen März und Juni wird auf den Anstieg der Lufttemperatur im Versuchshaus zurückgeführt.

Das Feuchteprofil über den Wandquerschnitt ist charakteristisch insbesondere für das kapillare Leitvermögen der Baustoffe. Gasbeton und Kalksandlochstein, Baustoffe mit unterschiedlicher kapillarer Leitfähigkeit, besaßen anfänglich den höchsten, annähernd gleichen volumetrischen Feuchtegehalt, über den Wandquerschnitt etwa gleich verteilt, mit Ausnahme der Konstruktion Gasbeton mit Putz.

Im restfeuchten Zustand ist

- bei Gasbeton das bekannte parabolische Feuchteprofil mit einem Maximum in Wandmitte, zwischen 10 und 20 cm vorhanden,

- bei den Leichtlochziegeln das Maximum praktisch in der äußeren Wandhälfte und - mit erheblich höherem Feuchtegehalt -
- bei den Hochlochziegeln ein praktisch ortsunabhängiges Profil vorhanden,
- bei den Kalksandlochsteinen das Maximum ausgeprägt auf die äußeren 20 cm der Hintermauerung konzentriert.

In allen vier Fällen sind diese Charakteristika gleichermaßen bei den Wänden mit Putz und mit Verblendmauerwerk vorhanden. Dies kann im Hinblick auf die Austrocknung nach außen nur bedeuten, daß diese beim Gasbeton und bei den Hochlochziegeln gar nicht und bei den Leichtlochziegeln - wegen der insgesamt guten Austrocknung - nicht nennenswert behindert ist, hingegen aber bei den beiden Kalksandlochstein-Konstruktionen.

3.3 Ergänzende Untersuchungen

3.3.1 Ermittlung der Baustofffeuchte aus der relativen Luftfeuchtigkeit

Künzel u.a. haben Überlegungen darüber angestellt, inwieweit bei bekannter Sorptionsisotherme auf den Feuchtegehalt eines Baustoffes geschlossen werden kann /19/.

Die durchgeführten Untersuchungen boten Gelegenheit, diesem Gedanken nachzugehen. Die anlässlich der letzten Bohrkernentnahme hergestellten Bohrlöcher in den Versuchswänden wurden gegen den Raum mit Plexiglasscheiben abgedeckt, die in Bohrkernachse eine verschließbare Öffnung von 20 mm Durchmesser enthielten. Durch diese Öffnungen konnten in dem abgeschlossenen Volumen (25 cm Länge, 50 mm Durchmesser) Temperatur und rel. Feuchte gemessen werden.

Bei den Meßwerten handelt es sich um integrale Werte, d.h. um Werte für eine rel. Feuchte, die sich aufgrund der Entfeuchtung von Baustoffbereichen unterschiedlicher Tiefe von der Innenoberfläche einstellt. Demgemäß sollte die Höchstfeuchte im Baustoff/Bauteilquerschnitt die rel. Luftfeuchte im Meßvolumen bestimmen.

Bei vier Messungen innerhalb von 26 Tagen im Anschluß an die Bohrkernentnahme vom 29.05.1986 wurden folgende Werte ermittelt:

	<u>Temperatur</u>	<u>rel. Luftfeuchte</u>
nach 2 Tagen	18,2 - 19,8 °C	62...73 %
nach 6 Tagen	19,0 - 21,2 °C	57...62 %
nach 14 Tagen	15,5 - 16,8 °C	68...79 %
nach 26 Tagen	19,8 - 20,9 °C	72...83 %

Hierbei ist zu beachten, daß die Sorptionsisothermen für die hier zu beurteilenden Baustoffe in weiten Temperaturbereichen von der Temperatur unabhängig sind, Temperaturgleichgewicht zwischen Baustoff und angrenzender Luftschicht vorausgesetzt.

Die Höchstwerte der rel. Feuchte wurden bei den ersten beiden Messungen in den Konstruktionen mit Außenputz - außer derjenigen mit dem Wärmedämmverbundsystem -, danach in den Gasbeton- und Kalksandstein-Konstruktionen ermittelt. Eine systematische, zeitlich konstante Zuordnung der relativen Feuchte zu den einzelnen Konstruktionen war nicht vorhanden.

Unter der - offenbar nicht erfüllten - Voraussetzung hygroskopischer Gleichgewichtsfeuchte hätte man bei Bezug auf die in Tabelle 4 angegebenen Sorptionswerte auf einen volumetrischen Feuchtegehalt von 0,3 % im Hochlochziegel und bis maximal 6 % im Kalksandstein schließen müssen; umgekehrt müßte man wegen des nachgewiesenermaßen deutlich höheren Feuchtegehalts in den Baustoffen eine rel. Luftfeuchtigkeit im Meßvolumen von 90 bis 98 % erwarten.

Die schlechte Übereinstimmung zwischen erwarteten und gemessenen Werten ist vermutlich auf folgende Ursachen zurückzuführen:

1. Die aus der Literatur entnommenen Desorptionsisothermen sind nicht zu einem derartigen Versuch geeignet. Sorptionsmessungen am selben Baustoff sind Voraussetzung für eine erfolgreiche wechselseitige Abschätzung von Feuchtegehalt bzw. rel. Luftfeuchte. Ziegelmaterial gleicher Rohdichte, jedoch aus verschiedenen Brenn-Chargen stammend, kann z.B. durchaus unterschiedliche Sorptionseigenschaften und damit im Gleichgewicht auch unterschiedliche Feuchtegehalte aufweisen /19/: Variation zwischen 0,5 und 3 %.

2. Die Desorption könnte noch nicht abgeschlossen gewesen sein, dafür spricht die Zunahme der rel. Luftfeuchte im Meßvolumen mit der Zeit - abgesehen von der Messung nach 6 Tagen.
3. Bei realen großformatigen Bauteilen/Baustoffproben besteht kein strenger Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und relativer Luftfeuchte, d.h. die Sorptionsisotherme eines Baustoffs ist eine mittlere Kurve mit einer unbekannten Schwankungsbreite. In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, daß zur Bestimmung von Sorptionsisothermen granuliertes Probenmaterial Verwendung findet.
4. Die Baustoffe wurden durch die Probenahme oberflächlich abgetrocknet: Trocknung durch die Erhitzung der Bohrkerne bei der Kernentnahme. Dann wären jedoch die aus der gemessenen rel. Feuchte geschlossenen Feuchtegehalte der Baustoffe tendenziell richtig.

3.3.2 Austrocknung von Gasbeton-Innenwänden

Im Hinblick auf die Frage der schnellstmöglichen Austrocknung von Gasbeton-Innenwänden - bei Vermeidung von Risses Schäden - ergab sich Gelegenheit, die Trocknung einer 12 m² großen, 250 mm dicken Trennwand aus Gasbeton-Blocksteinen G2 - 0,5, mit Dünnbettmörtel vermauert und beidseitig mit 10 mm Hagalithputz geputzt, zu untersuchen. Diese Wand wurde zwischen zwei gleichartigen fensterlosen Räumen von je 50 m³ Raumvolumen errichtet.

Der Gasbeton mit einer Trockenrohdichte von 454 kg/m³ wurde mit 18,3 Vol.-% Feuchtegehalt eingebaut. Die Anfangsfeuchte des Gasbetons in der fertigen Wand betrug infolge des Naßputzes im Mittel 19,7 Vol.-%.

Die Austrocknung der Wand wurde über einen Zeitraum von 125 Tagen verfolgt. Zur Entfeuchtung der Raumluft diente der o.g. Luftentfeuchter, der wechselseitig in einem der beiden Nachbarräume in Abhängigkeit von Höhe und zeitlicher Änderung der rel. Luftfeuchte aufgestellt wurde. Die Lufttemperatur betrug in beiden Räumen ca. 20 °C, bis zum Alter von 40 Tagen, danach 30 Tage ca. 35 °C, anschließend wiederum 20 °C.

Zur Bestimmung des Feuchtegehalts im Gasbeton wurden in bestimmten Zeitabständen auf beiden Seiten der Wand längs der Wanddiagonalen an drei Stellen Bohrkerne von ca. 50 mm Durchmesser - jeweils über die halbe Wanddicke in zwei Stücken von 60 bis 65 mm Länge - trocken erbohrt und bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet. Die Bohrlöcher wurden anschließend mit zuvor aus nicht verbauten Gasbetonsteinen entnommenen zylindrischen Kernabschnitten wieder trocken verschlossen. Diese Art der Feuchtebestimmung war naturgemäß nur möglich, weil die zu untersuchende Wand wesentlich dicker als eine übliche Trennwand war.

Das Feuchteprofil über den Wandquerschnitt konnte somit anhand von vier aus drei Einzelwerten gebildeten Mittelwerten über jeweils 62,5 mm Wandtiefe beurteilt werden. Die Feuchteverteilung über die Wandoberflächen war über die gesamte Austrocknungszeit so gleichmäßig, daß eine Differenzierung der einzelnen Entnahmestellen nicht erforderlich war.

Die Änderung des Feuchtegehalts im Wandquerschnitt zeigt Tabelle 8, das Feuchteprofil ist in Bild 10 dargestellt.

Untersuchungsergebnisse:

Der Trocknungsverlauf steht in Übereinstimmung mit der Erwartung:

Anfangs-Feuchte höher als die Gasbetonfeuchte vor dem Putzen, s.o.

Nach 8 Tagen: Feuchte über den gesamten Wandquerschnitt konstant ca. 18 Vol.-%.

Nach 54 Tagen: Feuchte auf der Oberfläche rd. 10 Vol.-%, im Kern 16 Vol.-%.

Darauf folgend: Austrocknung unter Erhaltung eines konstanten Feuchtegradienten von 1,1 Vol.-%/cm bis zum Abbruch der Untersuchungen:

Feuchte auf der Oberfläche rd. 5,5 Vol.-%, im Kern noch 12,3 Vol.-%.

Die Austrocknungsrate lag zwischen 11,8 und 1,9 g/h je m² Wandoberfläche, die Feuchteabgabe zwischen 2,8 und 0,46 g/m²h.

Die Menge des im Entfeuchter abgeschiedenen Wassers stimmte anfänglich, d.h. bei hoher Raumluftfeuchte, gut mit der Menge der aus der Wand abgeführten Feuchte überein, nicht jedoch zu einem späteren Zeitpunkt, wo der Feuchteverlust der Wand ein Mehrfaches der im Luftentfeuchter gesammelten Wassermenge betrug; dies dürfte auf einen geringeren Wirkungsgrad des Luftentfeuchters bei niedrigeren Luftfeuchten zurückzuführen sein.

Tabelle 8: Austrocknung einer Gasbeton-Innenwand

Alter in Tagen	Volumenbezogene Feuchte in % über den Wandquerschnitt a...b in mm					Entfeuchtungs- menge in l
	0...62,5	62,5...125	125...187,5	187,5...250	Mittelwert 0...250	
0	20,8	18,4	18,4	21,2	19,7	-
8	18,2	18,0	18,1	17,5	18,0	49,7
18	14,6	16,3	17,2	14,7	15,7	58,5
36	12,3	16,2	16,3	12,6	14,3	58,8
54	9,7	16,3	16,5	10,0	13,1	35,3
70	7,4	14,4	14,8	7,3	11,0	30,7
125	5,4	12,3	12,3	5,7	8,0	16,2

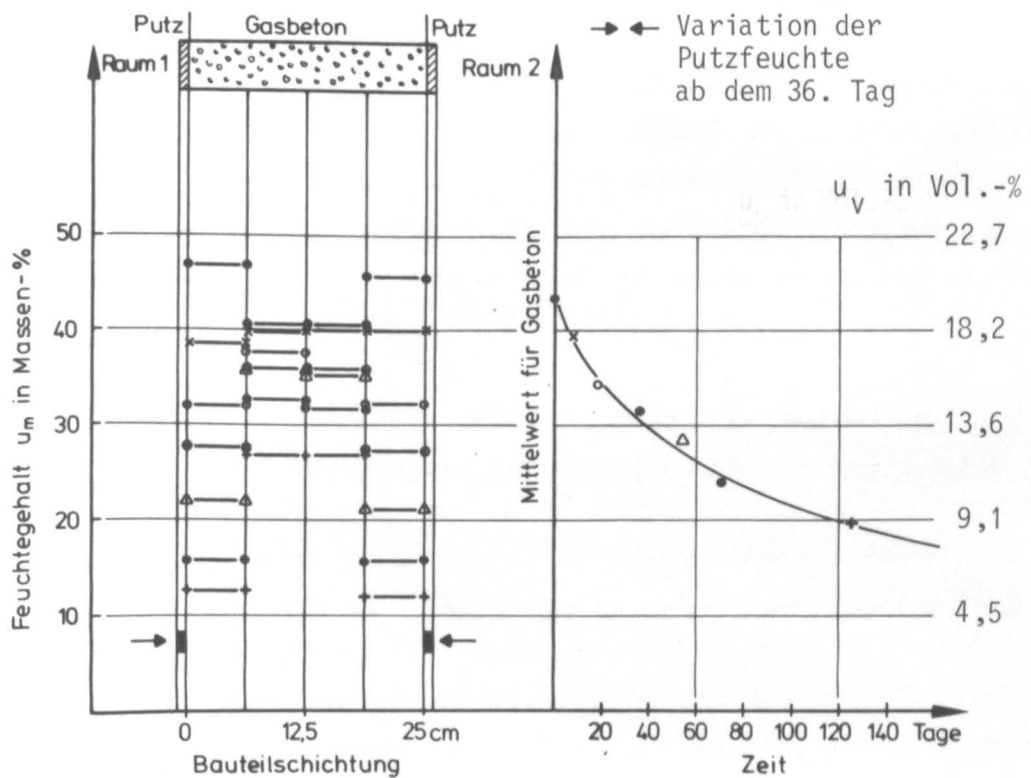


Bild 10: Austrocknung einer Gasbeton-Innenwand

3.3.3 Änderung der rel. Luftfeuchte in Räumen durch Austrocknung von Bauteilen

Wie bereits dargestellt, interessiert das Austrocknungsverhalten von Bauteilen aus zwei Gründen:

- feuchte Bauteile bieten einen geringeren Wärmeschutz,
- feuchte Bauteile erhöhen die Luftfeuchte in den angrenzenden Räumen.

Beide Gründe begünstigen die Entstehung von Feuchteschäden. Daher stellt sich die Frage, wie schnell in kapillaraktiven Baustoffen - etwa nach Befuchtung einer Fläche/Schicht - die Feuchte transportiert und von der gegenüberliegenden Fläche an den Raum abgegeben werden kann. Für Neubauten ist diese Fragestellung so lange interessant, wie der Feuchtegehalt der Baustoffe größer ist als die hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte. Ein weiteres Beispiel hierfür ist zweischaliges Mauerwerk ohne Luftschicht, dessen Fugennetz nicht hinreichend schlagregendicht ausgeführt sei. Gleichermäßen wichtig wie für Neubauten ist diese Fragestellung für Altbauten - insbesondere vor Modernisierung der Fenster - mit im Laufe der Zeit an Bindemitteln verarmten oder mit Rissen behafteten Außenputzen.

Es wurde folgender Versuch durchgeführt: Ein wasserdampfdichtes Gefäß von 60 l Rauminhalt, das auf seiner Oberseite eine Öffnung von 10 cm Durchmesser besaß, wurde mit einem zuvor bei 105 °C getrockneten, 11,5 cm hohen Kalksandvollstein abgedeckt und abgedichtet. Der Kalksandstein wurde allseitig dampfdicht umhüllt bis auf eine 2 cm x 2 cm große Fläche auf seiner, der Öffnung im Gefäß gegenüberliegenden Oberseite.

Diese Anordnung wurde in einem Klimaschrank aufgestellt, zusammen mit zwei Hygrothermografen, einem innerhalb des dampfdichten Gefäßes, dem anderen außerhalb.

Um von Schwankungen des Raumklimas unabhängig zu sein, wurde der folgende Versuch bei 42 °C durchgeführt.

Nach einer Konsolidierungszeit von mehreren Tagen außerhalb und im Gefäß:

$$\vartheta = 42 \text{ °C}, \quad \varphi = 27 \text{ \%}, \quad m = 0,91 \text{ g},$$

wurden auf die obere, freie Fläche des Kalksandsteins 4 ml Wasser langsam aufgetropft, das sofort aufgesogen worden ist. Anschließend wurde die Befuchtungsfläche lose überdeckt.

Unmittelbar nach dem Auftropfen des Wassers stieg die Feuchte im Klimaschrank über einen Zeitraum von etwa zwei Stunden um rd. 20 % an, um dann allmählich wieder auf den Ausgangswert abzufallen. Im dampfdichten Gefäß jedoch setzte rund zwei Stunden nach der Befeuchtung ein über vier Tage (Ende der Registrierung) anhaltender Anstieg der rel. Feuchte von 27 % auf 75 % ein ($m = 2,54 \text{ g}$), d.b. $\Delta m = 1,63 \text{ g}$. Die größte Austrocknungsrate betrug $3,07 \text{ g/m}^2\text{h}$.

Bei diesem Versuch entsprach das Verhältnis von Verdunstungsfläche zu "Raum"-Volumen dem eines normalen Raumes mit $3,9 \text{ m}^2$ Wandoberfläche (Außenwand) bei 30 m^3 Raumvolumen.

Der Versuch zeigt nicht nur, daß kapillaraktive Baustoffe, insbesondere Ziegel und Kalksandstein, die Feuchte über einen größeren Baustoffquerschnitt schnell verteilen können, sondern demonstriert augenfällig, daß sich die Luftfeuchte in Räumen entsprechend dem Feuchtegehalt der Umfassungsbauteile einstellt.

Bezugnehmend auf das Beispiel Blatt 16/17 sei wiederum angenommen, daß in einem Raum mit 5 m^3 Volumen je m^2 Außenwandfläche im Bereich von Wärmebrücken ein Tauwasserschaden eintritt, wenn die rel. Luftfeuchte um 10 % ansteigt; dann beträgt die kritische Wasserdampfproduktion $1,73 \text{ g/m}^3$. Somit müßten also nur $8,65 \text{ g}$ Wasserdampf je m^2 Außenwandfläche an die Raumluft abgegeben werden, um die Schadeneintrittsbedingung zu erfüllen. Das bedeutet eine mittlere Feuchteänderung gegenüber einer trockenen Wand aus Kalksandstein, z.B. 30 cm dick, Rohdichte 1400 kg/m^3 , von nur 0,0021 Massen-%, entsprechend ca. 0,003 Vol.-%.

Diese Überlegung setzt zunächst voraus, daß der betrachtete Raum nicht gelüftet wird. Bei einem Luftwechsel von $n_L = 0,5 \text{ h}^{-1}$ gemäß DIN 4701 müßte die verdunstende Wassermenge zur Erzielung von Schadensfreiheit ständig abgeführt werden; daher dürfte die Verdunstungsrate einen Wert von $4,33 \text{ g/m}^2\text{h}$ nicht überschreiten. Im o.g. Versuch und im Versuchshaus wurden für Kalksandstein zwar nur zwei Drittel dieses Wertes ermittelt; dabei ist jedoch zu bedenken, daß - im Gegensatz zu bewohnten Räumen - keinerlei andere Feuchtequellen vorhanden waren.

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Ziel des Forschungsvorhaben war es, die Austrocknungszeit von Mauerwerk zu ermitteln und einen Zusammenhang zwischen austrocknender Baufeuchte und dem zur Vermeidung von Feuchteschäden erforderlichen Luftwechsel in Neubauten herzustellen.

Nach allgemeiner Auffassung sind Bauten dann hinreichend ausgetrocknet, wenn ihre Außenbauteile keinen höheren als den sog. Praktischen Feuchtegehalt aufweisen. Dabei sollte es selbstverständlich sein, daß sich eine Beurteilung des Feuchtegehalts auf die Wetterseite der Gebäude/Bauteile bezieht.

An einem Versuchshaus mit 30 cm dicken Außenwänden aus abschnittsweise unterschiedlichem Mauerwerk wurde daher der Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der Zeit durch Bohrkernentnahme gravimetrisch bestimmt und hierdurch festgestellt, daß Gasbeton-Blocksteinmauerwerk - verputzt oder mit Verblendmauerwerk - von 19 bzw. 15 Vol.-% Anfangsfeuchte in etwa 2,5 Jahren auf den Praktischen Feuchtegehalt austrocknet, hingegen Hochlochziegel- und Kalksandstein-Mauerwerk, ausgehend von 7 bis 13 Vol.-% Anfangs-/Höchstfeuchte nach 2 Jahren (Ende der Untersuchungen) einen etwa stationären Feuchtegehalt erreicht, der beim 1,6- bis 3-fachen des Praktischen Feuchtegehalts liegt.

Unterschiede im Austrocknungsverhalten geputzter Wände im Vergleich zu solchen mit Vormauerwerk waren nicht festzustellen.

Die im Gegensatz zu früheren, etwa 30 Jahre zurückliegenden Untersuchungen um mindestens 1 Jahr längeren Austrocknungszeiten werden auf die gewählten Lüftungsbedingungen zurückgeführt, die hier gemäß der Forschungsabsicht und entsprechend den Beobachtungen bei Schadensfällen eine hohe Raumluftfeuchte von rd. 60 % zur Folge hatten.

Die höchsten mittleren Austrocknungsraten - bezogen auf die Zeitspanne zwischen zwei Feuchtebestimmungen - betrugen bei Gasbeton-Mauerwerk 12,6 g/m²h und bei Hochlochziegel- und Kalksandstein-Mauerwerk ca. 4 g/m²h. Im Alter von 420 Tagen betrug die Austrocknungsrate von Gasbeton noch 5 g/m²h. Vergleichbare Austrocknungsraten sind aus der Literatur bekannt und konnten durch ergänzende Untersuchungen bestätigt werden.

Eine Abschätzung der Austrocknungszeit von Baufeuchte allein durch Berechnung der ausdiffundierenden Wasserdampfmenge ist nicht möglich, weil im Bereich hoher Feuchtegehalte die Diffusion als Feuchtetransportmechanismus eine untergeordnete Bedeutung besitzt.

Dampfbremsende Beschichtungen auf der Außenseite von Wandkonstruktionen verzögern zwar die Austrocknung, verhindern sie aber nicht.

In Neubauten wird häufig der Zusammenhang zwischen hohem Feuchtegehalt der Bauteile und Ort der Feuchteschäden nicht erkannt oder falsch beurteilt: Die von Wandflächen an den Raum abgegebene Feuchte führt nämlich zunächst zu einer Erhöhung der rel. Luftfeuchtigkeit der Raumluft, die erst sekundär zur Tauwasserbildung im Bereich geometrischer Wärmebrücken und auf anderen Stellen mit geringer Oberflächentemperatur Anlaß gibt.

Weil Feuchteschäden durch intensives Lüften vermieden werden können, wird jedoch ggf. jedem Betroffenen zunächst einmal "falsches Wohnverhalten" vorgeworfen. Dieser Vorwurf ist nicht gerechtfertigt, wenn im Falle zu hoher Austrocknungsraten zum Abbau der Baufeuchte mehr gelüftet werden muß, als gewohnt werden darf.

Die zulässige Feuchteerzeugung in Räumen ist von einer Vielzahl von Einflußgrößen abhängig und kann deshalb im Einzelfall nicht hinreichend genau angegeben werden. Jedoch kann es aufgrund der Schadenshäufigkeit in Bauten mit fugendichten Fenstern als sicher gelten, daß die Aufnahmefähigkeit der Raumluft für Feuchtigkeit in der Nähe eines Grenzwertes liegt, der bei unsachgemäßer - aber dennoch normaler - Wohnungsnutzung hinsichtlich Lüften, Heizen, Möblieren, Pflanzenhaltung etc. schnell überschritten wird.

Daraus folgt, daß zum Abführen nicht nutzungsbedingter Feuchte, wie eben der Baufeuchte in Neubauten, ein zusätzlicher Luftwechsel herbeigeführt werden muß, der aber eine Größenordnung nicht überschreiten darf, die eine übliche Wohnungsnutzung ausschließt.

Unter Zugrundelegung einer zur Verhütung von Feuchteschäden maximal zulässigen Feuchtekonzentration der Raumluft $\Delta c = 6 \text{ g/m}^3$ /27/ kann dieser zusätzlich notwendige Luftwechsel

- je nach Austrocknungsrate: 1 bis 20 g/m²h und
- je nach dem Verhältnis von Außenwandfläche zu Raumvolumen: 0,2...0,8 m⁻¹,
ohne Berücksichtigung der Austrocknung von Innenwänden

zwischen 0,03 und 2,7 h⁻¹ liegen.

Der obere Grenzwert für den Luftwechsel macht eine normale Nutzung unmöglich; denn er bedeutet beispielsweise, daß ein Neubau mit üblich fugendichten Fenstern täglich 6 Stunden pro Tag gelüftet werden müßte, d.h. bauphysikalisch sinnvoll im Abstand von 3 Stunden jeweils 1 Stunde - rund um die Uhr.

Legt man andererseits der Abschätzung der zulässigen Austrocknungsrate den anerkannt hygienisch notwendigen Luftwechsel - mit einem angemessenen, zumutbaren Zuschlag für Neubauten - zugrunde, etwa dreimal täglich halbstündiges Lüften mit geöffnetem Fensterflügel, ansonsten jahreszeitlich bedingt geschlossene Fenster ($\bar{n}_L = 1,0 \text{ h}^{-1}$), so ergibt sich für die ungünstigsten Verhältnisse von Außenwandfläche zu Volumen eine obere Austrocknungsrate von rd. 1 g/m²h, die bei Bezug von Neubauten nicht mehr überschritten werden darf, wenn Feuchteschäden bei normaler Raumnutzung vermieden werden sollen.

Dabei wird vorausgesetzt, daß alle Bauteile den wärme- und feuchtetechnischen Anforderungen der DIN 4108 und der Schlagregenschutz der Putze DIN 18 550 genügen. Für Verblendmauerwerk sind entsprechende Anforderungen ($w \leq 2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h}^{0,5})$ und $s_d \leq 2 \text{ m}$) zwar gleichermaßen sinnvoll, sie werden aber nicht gestellt.

Naturgemäß bereitet es große Schwierigkeiten sicherzustellen, daß die Austrocknungsrate bei Bezug die genannten Höchstwerte nicht überschreitet.

Hierzu erscheinen zwei Wege erfolversprechend:

1. In Neubauten wird der Luftwechsel vorübergehend dadurch verbessert, daß Fenster zunächst ohne Dichtung eingebaut und diese z.B. erst 1 Jahr nach Bezug nachgerüstet werden. Dies sollte eine ausreichende Präventivmaßnahme sein; entsprechende Erfahrungswerte fehlen.

In Altbauten sollte vor dem Einbau neuer Fenster grundsätzlich die Wasseraufnahmefähigkeit der Außenbekleidung, i.a. also der Außenputze, geprüft werden. Auch hier wäre noch eine Wissenslücke zu schließen: Bisher ist nämlich nicht bekannt, welcher Zusammenhang zwischen dem nur im Labor an Putzproben zu ermittelnden Wasseraufnahmekoeffizienten w und dem am ausgeführten Bau häufig ermittelten Wassereindringwert nach Karsten/Grunau besteht.

2. Zur Absichtung hinreichender Austrocknung könnte die Austrocknungsrate - vor Bezug - gemessen werden, z.B. in einfacher Weise durch Registrierung der Luftfeuchte; Meßprinzip und Auswertung wären einfach, zusätzlicher Aufwand mit Kosten jedoch unvermeidbar. Ein derartiges Verfahren wäre nur in den Fällen zu empfehlen, wo Hand in Hand mit dem Rohbau der Innenausbau "hochgezogen" wird und der Bezug des Neubaus aus Kostengründen zum frühestmöglichen Zeitpunkt erfolgen muß.

Mit dem abgeschlossenen Forschungsvorhaben konnte eine Reihe wichtiger Fragen zur Austrocknung von Mauerwerk untersucht, aber nicht immer befriedigend beantwortet werden. Daher werden weitere Untersuchungen für notwendig gehalten.

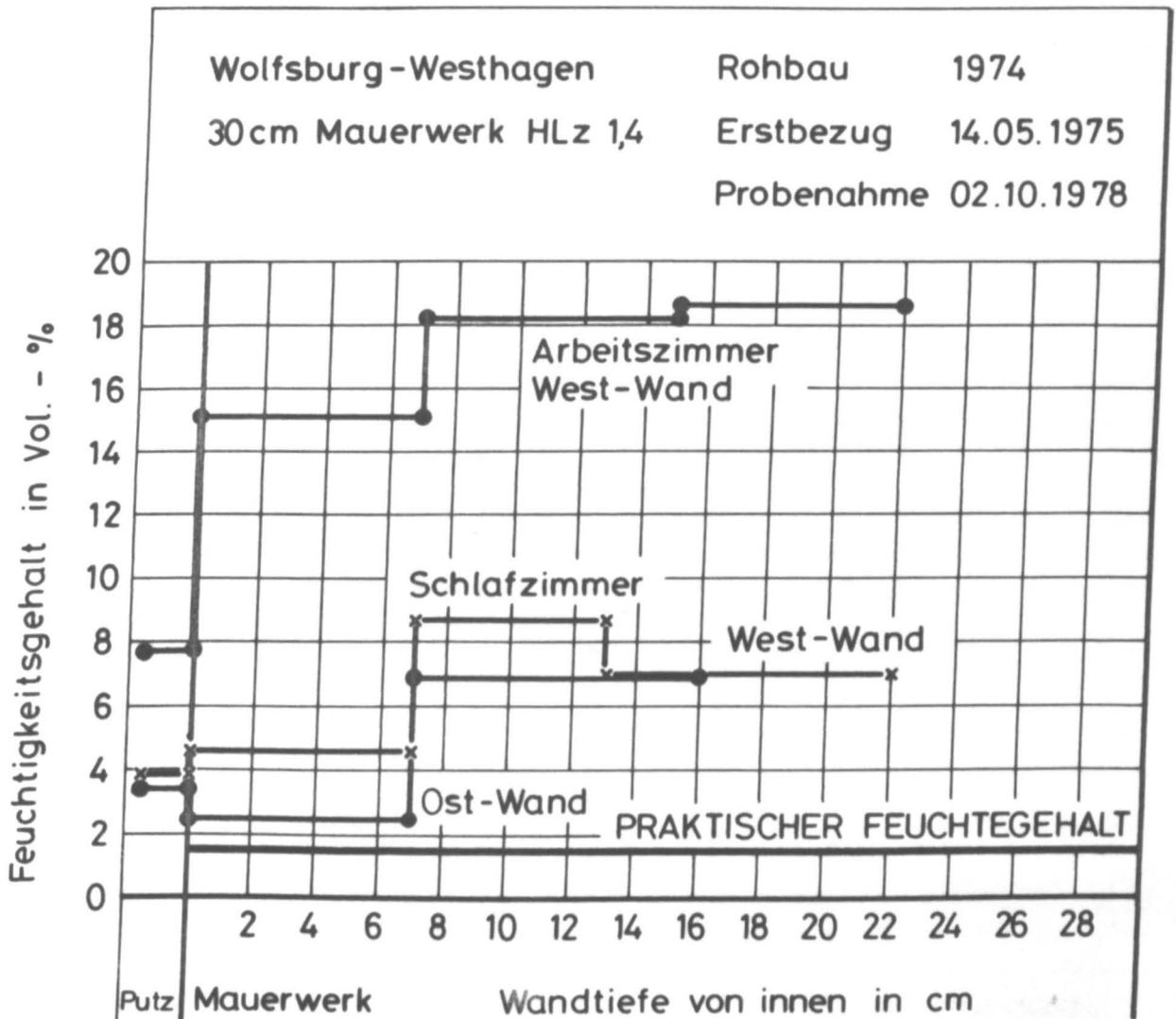
Braunschweig, den 28. April 1987

5. Literaturhinweise

- / 1/ Haller, P.:
Der Austrocknungsvorgang von Baustoffen.
Diskussionsbericht 139 der Eidgenössischen Material-
prüfungs- und Versuchs-Anstalt, Zürich (1942).
- / 2/ Cadiergues, Roger:
Isolation et Protection des Batiments.
Traité du Batiment.
Editions Eyrolles, Paris 1954.
- / 3/ Wissmann, W.:
Über das Verhalten von Baustoffen gegen Feuchtigkeits-
einwirkungen aus der umgebenden Luft.
Dissertation, Darmstadt 1954.
- / 4/ Cammerer, J.S., Schäcke, H.:
Feuchtigkeitsregelung, Durchfeuchtung und Wärmeleit-
fähigkeit bei Baustoffen und Bauteilen.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 5, Berlin 1957.
- / 5/ Reiher, H., Künzel, H. und v. Soden, D.:
Wärme- und Feuchtigkeitsschutz in Wohnbauten.
Berichte über Reihen-Vergleichsversuche 1952 bis 1956.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 8, Berlin 1958.
- / 6/ Krischer, O:
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik,
2. Auflage.
Berlin / Göttingen / Heidelberg 1959.
- / 7/ Kristen, Th. und Blunk, G.:
Untersuchungen über die Regendurchlässigkeit von Außen-
wänden zur Klärung von Bauschäden.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 11, Berlin 1959.
- / 8/ Reiher, H., Künzel, H., Frank, W. und Labus, H.:
Wärme- und Feuchtigkeitsschutz in Wohnbauten.
Berichte über Reihen-Vergleichsversuche 1956 bis 1959.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 16, Berlin 1960.
- / 9/ Schüle, W.:
Wärme- und feuchtigkeitstechnische Untersuchungen an
Außenwänden aus verschiedenen Lochziegeln und aus
Leichtbeton-Hohlblocksteinen.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 23, Berlin 1962.
- /10/ Cammerer, J.S.:
Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie.
4. Auflage.
Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962.

- /11/ Künzel, H.:
Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in häufig beregneten Außenwänden.
Gesundheits-Ingenieur 85 (1964) Nr. 9, S. 274 - 280.
- /12/ Künzel, H.:
Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in Außenwänden mit dichter Außenverkleidung.
Boden, Wand und Decke (1965), S. 822 - 834.
- /13/ Schüle, W.:
Feuchtigkeit in Bauteilen von Wohnhäusern.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 48,
Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1966.
- /14/ Künzel, H. und Schwarz, B.:
Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 51,
Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1968.
- /15/ Künzel, H. und Gertis, K.:
Untersuchungen über den praktischen Feuchtigkeitsgehalt von Wohnungsaußenwänden aus Schwerbeton-Hohlblocksteinen.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 51,
Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1968.
- /16/ Schwarz, B.:
Die Wärme- und Stoffübertragung an Außenwandoberflächen.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 79,
Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1972.
- /17/ Künzel, H.:
Der kritische Feuchtigkeitsgehalt von Baustoffen.
Institut für Bauphysik, Bericht B Ho 1/74 vom
15.02.1974, Stuttgart.
- /18/ Kießl, K. und Gertis, K.:
Feuchtetransport in Baustoffen.
Eine Literatursauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene.
Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen der Universität-Gesamthochschule Essen, Heft 13 (1980).
Darin ca. 650 Literaturzitate enthalten.
- /19/ Künzel, H.:
Untersuchungen und Überlegungen zur Frage des "praktischen Feuchtegehaltes" von Baustoffen.
Institut für Bauphysik, Bericht B Ho 24/80 vom
28.07.1980, Stuttgart.
- /20/ Steinert, J., Draeger, S. und Paulmann, K.:
Eingrenzung der klimatischen Bedingungen für die Entstehung von Wandschimmel in Wohnräumen.
Gesundheits-Ingenieur 102 (1981), S. 57 - 67.
- /21/ Harre, W.:
POROTON, der moderne Baustoff. 3. Auflage.
Bochum, etwa 1982.

- /22/ Kießl, K.:
Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen.
Dissertation, Essen 1983.
- /23/ Steinert, J.:
Mängel und Schäden durch unzureichende Wohnungslüftung.
Erfahrungen und Ursachen.
Kolloquium Wohnungslüftung/-heizung in Zukunft.
Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 1983.
- /24/ Breyer, G.:
Baufeuchte - Schlagwort oder Problem.
Zement und Beton, Heft 4 (1985), S. 14...18.
- /25/ Künzel, H.:
Regenschutz von Außenwänden durch mineralische Putze.
Der Stukkateur, Heft 5 (1985), S. 3...8,
und andere thematisch gleiche Veröffentlichungen.
- /26/ Künzel, H.:
Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen?
Bauphysik 8 (1986), S. 33...39.
- /27/ Erhorn, H. und Gertis, K.:
Mindestwärmeschutz oder/und Mindestluftwechsel.
Gesundheitsingenieur 107 (1986), S. 12...14 / 71...76.
- /28/ Glaser, H.:
Wasserdampfdiffusion durch hygroskopische Baustoffe im Hinblick auf die DIN 4108.
Gesundheitsingenieur 107 (1986), S. 85...97.
- / - / Recknagel/Sprenger:
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 61. Ausgabe.
R. Oldenbourg München Wien 1981.



Ursache der Feuchteschäden:

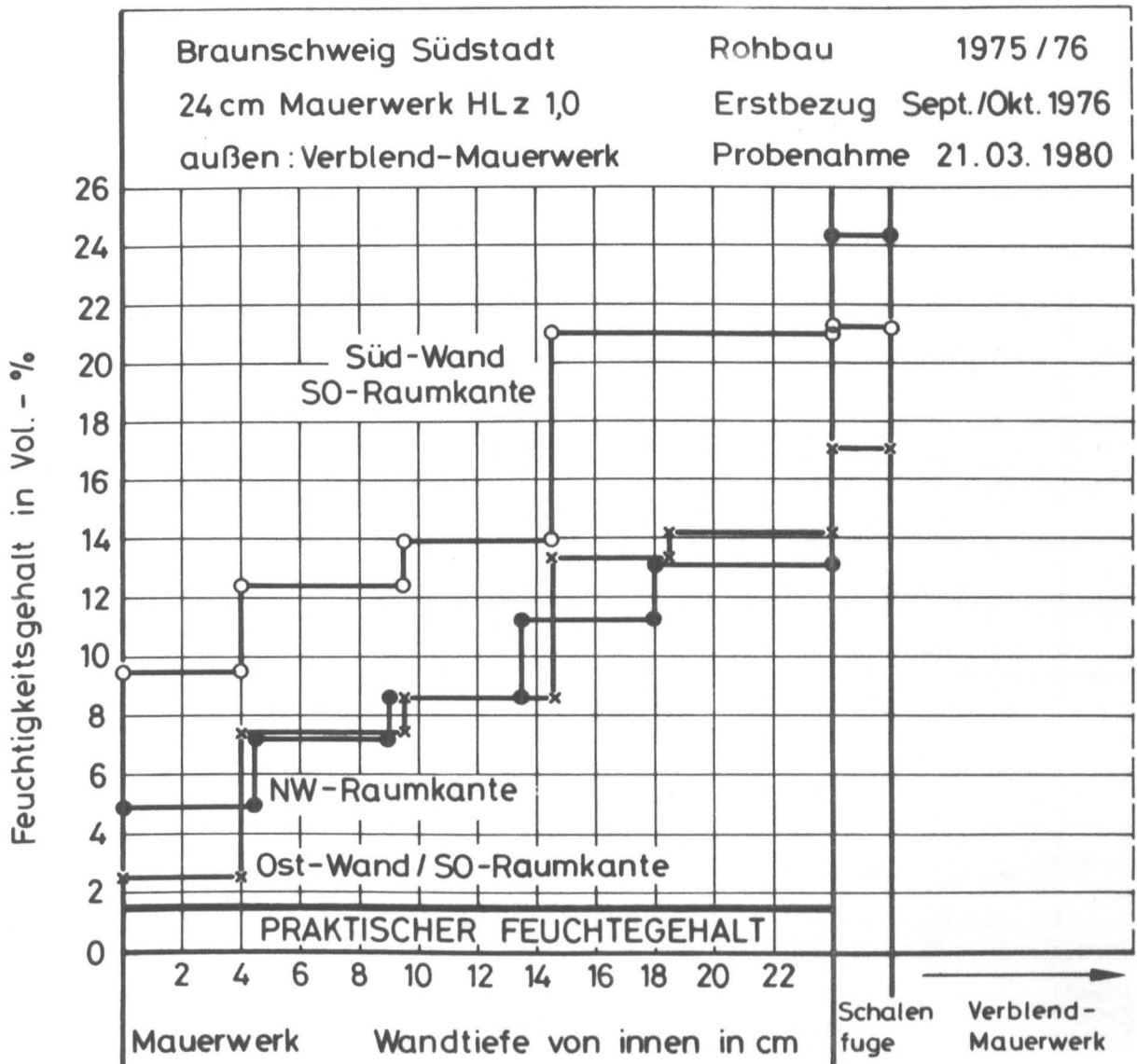
Erhöhter Feuchtegehalt vermindert Wärmeschutz und führt zu überhöhter Luftfeuchte.
 Außenputz (dunkelgrün eingefärbt) weist Risse auf.

Sanierung:

Vorgehängte Fassade auf Teilflächen

Anmerkungen:

Die Feuchteverteilung über den Wandquerschnitt ist unabhängig von der Hauptwetterrichtung.
 Der hohe Feuchtegehalt im Arbeitszimmer wird auf einen vermutlich durch den gesamten Wandquerschnitt verlaufenden Riß zurückgeführt.



Ursache der Feuchteschäden:

Mangelhafte Austrocknung der Baufeuchte.

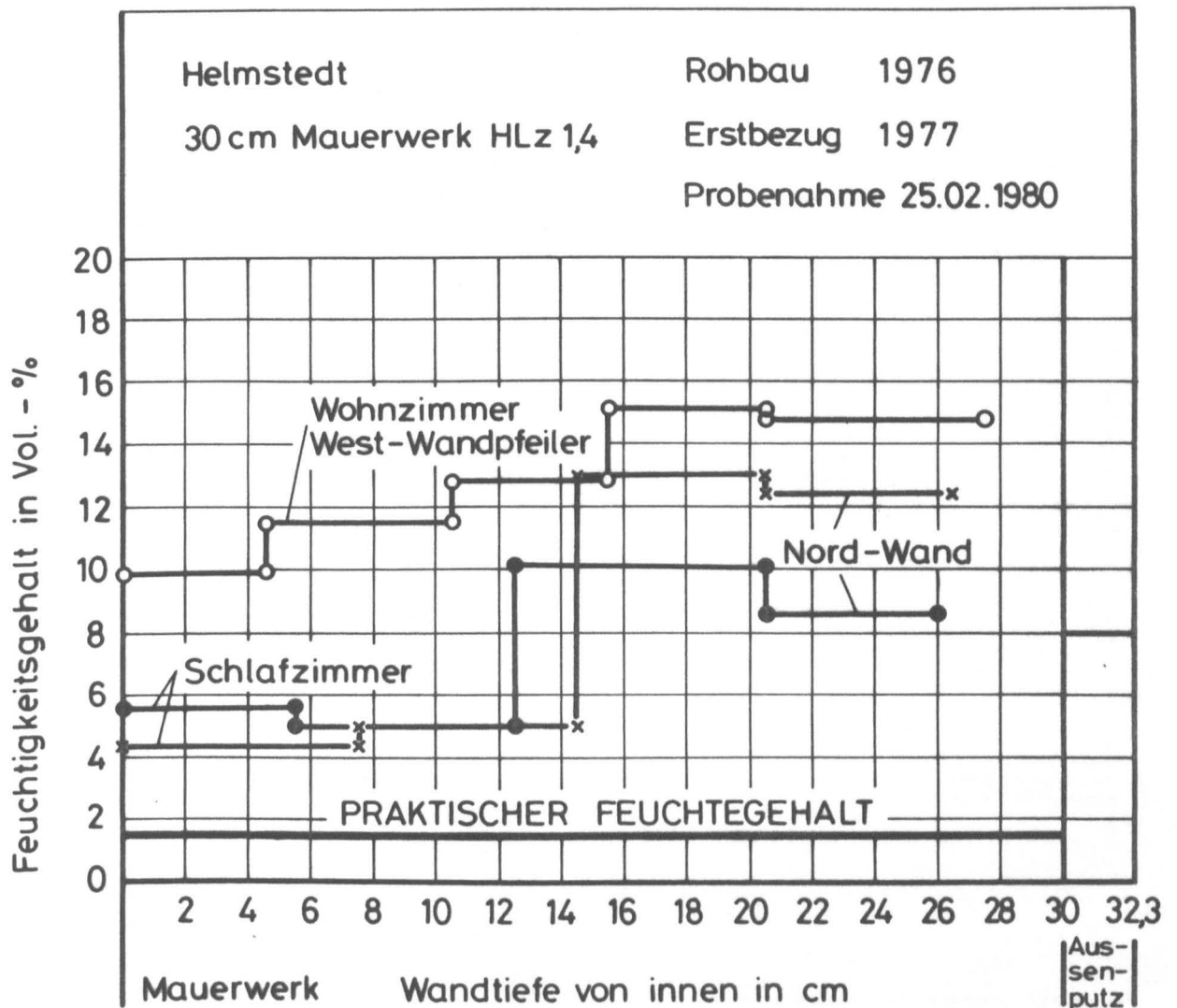
Die Vormauerziegel hatten Klinkerqualität. Die Verfüzung des Verblendmauerwerks war nicht zu beanstanden: keine Schwindrisse, keine Abrisse Stein/Mörtel; Fugenmörtel gut eingeschlämmt und verdichtet.

Sanierung:

Vorgehängte Fassade auf Teilflächen

Anmerkungen:

Die Feuchteverteilung ist unabhängig von der Hauptwetterrichtung. Feuchteschäden, vorzugsweise entlang der Raumkanten (bis zu 50 cm breite Streifen), nicht in Fußboden- und Deckenzwickeln.



Ursache der Feuchteschäden:

Mangelhafte Austrocknung der Baufeuchte und zu schneller Bezug.

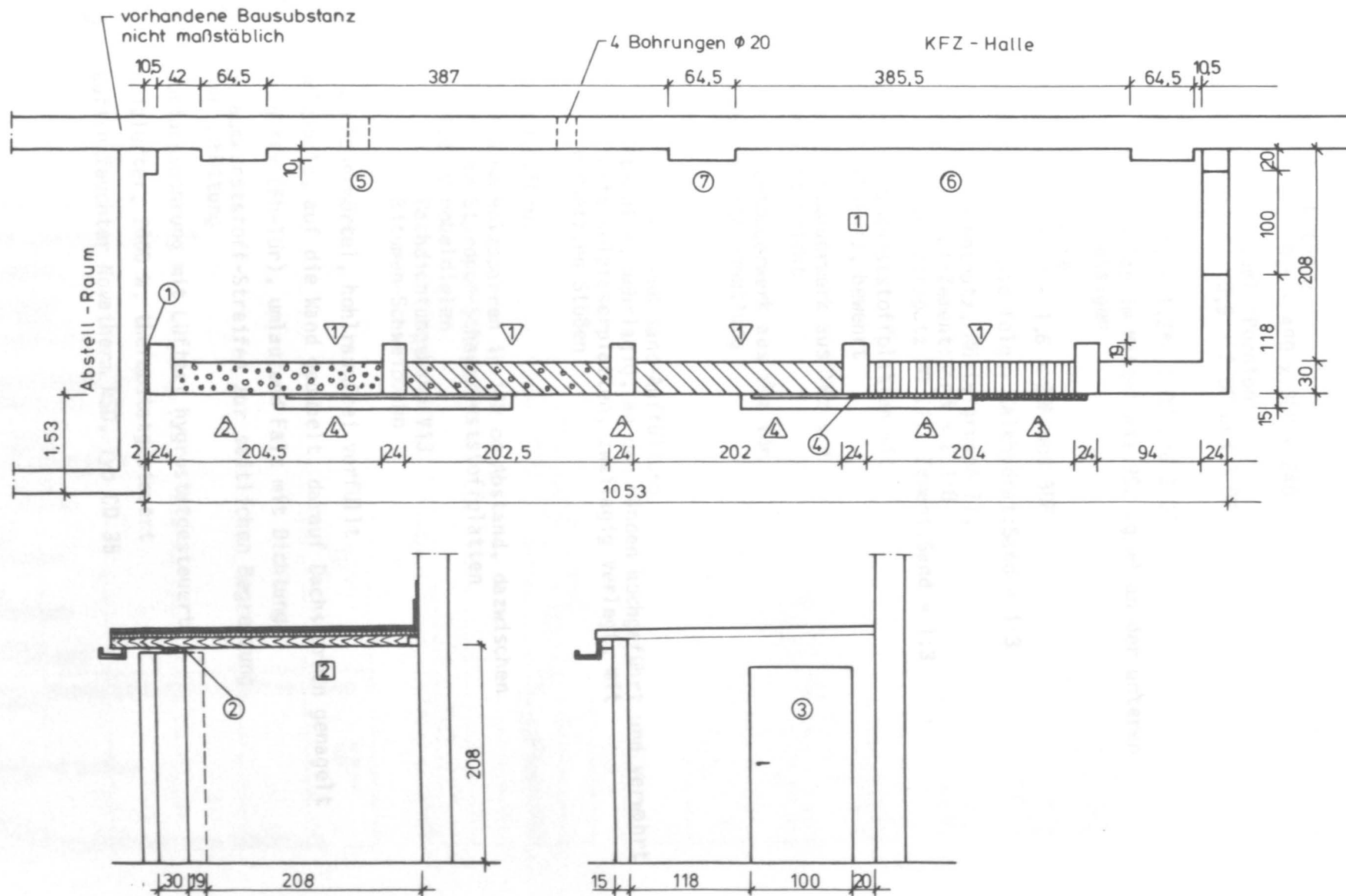
Außenputz mit wasserabweisendem Zusatzmittel $\mu = 23$,
 Hochlochziegel-Scherben $\mu = 35$;
 innen 15 mm Maschinengipsputz

Sanierung:

Wärmedämm-Verbundsystem

Anmerkungen:

Die Feuchteverteilung ist unabhängig von der Hauptwetterrichtung.
 Feuchteschäden nicht nur in Raumecken.



Legende:

Gasbeton-Blocksteine

DIN 4165 - G2 - 0,5 - 490 x 300 x 240



Leichthochlochziegel "Poroton"

DIN 105 - HLzA 6 - 0,9 - 2 DF und 3 DF



Hochlochziegel

DIN 105 - HLzA 12 - 1,2* - 2 DF und 3 DF

*) Die Rohdichte lag im Mittel mit 992 kg/m^3 an der unteren Grenze des Zulässigen



Kalksandlochsteine

DIN 106 - KSL - 12 - 1,6 - 2DF und 3DF



15 mm Kalkputz, wie folgt: Kalkhydrat:Sand = 1:3



25 mm Kalkzementputz, Mörtelgruppe II,
Kalkhydrat:Zement:Sand = 2:1:8
aus Vorspritzputz MG III, Zement:Sand = 1:3



40 mm Schaumkunststoffplatten mit
10 mm ISPO-Putz, bewehrt



115 mm Sichtmauerwerk aus VMz vor
40 mm Luftschicht



115 mm Sichtmauerwerk aus VMz vor
40 mm Perlite-Schüttung



Fußboden-Aufbau:

Schlacke- und Sand-Auffüllung
PE-Folie, mehrlagig, an den Wänden hochgeführt und verwahrt
16 mm harte Holzfaserplatten, zweilagig verlegt, mit
versetzten Stößen



Decken-Aufbau:

60/120 mm Holzsparren in 100 cm Abstand, dazwischen
60 mm Styropor-Schaumkunststoffplatten
24/120 mm Hobeldielen
Dachdichtungsbahn V13
Bitumen-Schweißbahn



2 cm Mauermörtel, hohlraumfrei verfüllt



Holzbohle, auf die Wand gedübelt, darauf Dachsparren genagelt



Stahltür (Fh-Tür), umlaufend Falz mit Dichtung



Schaumkunststoff-Streifen zur seitlichen Begrenzung der Schüttung



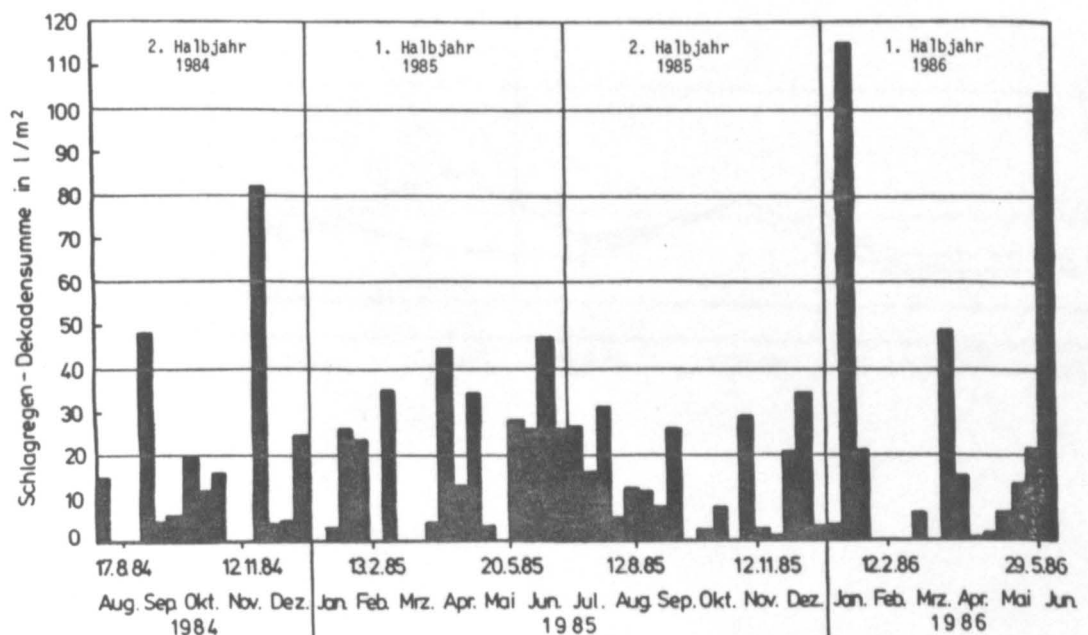
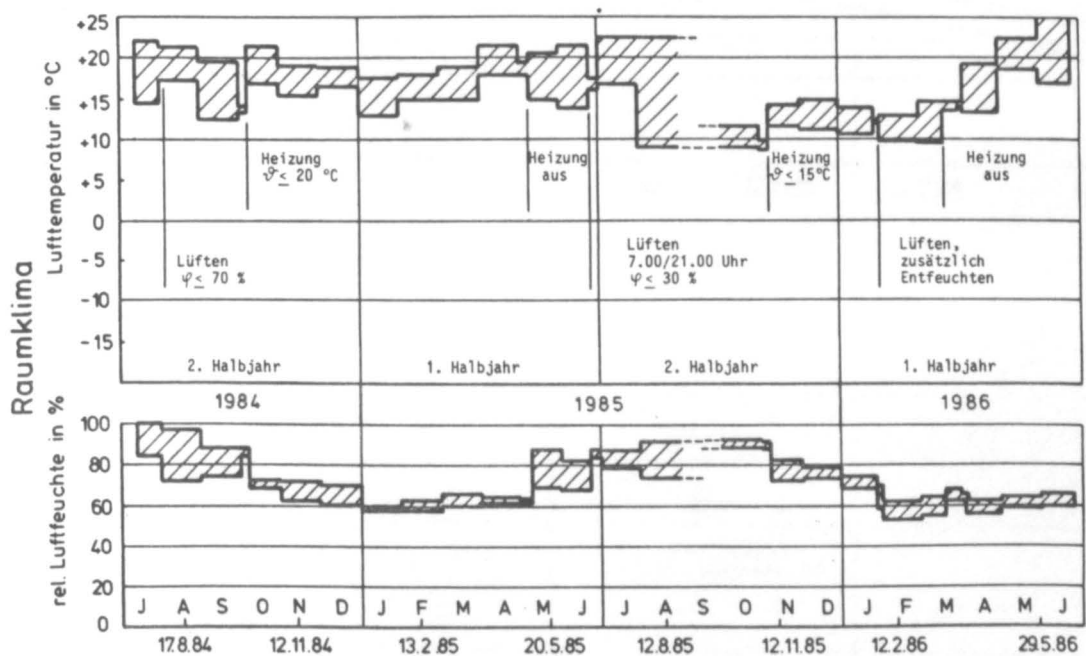
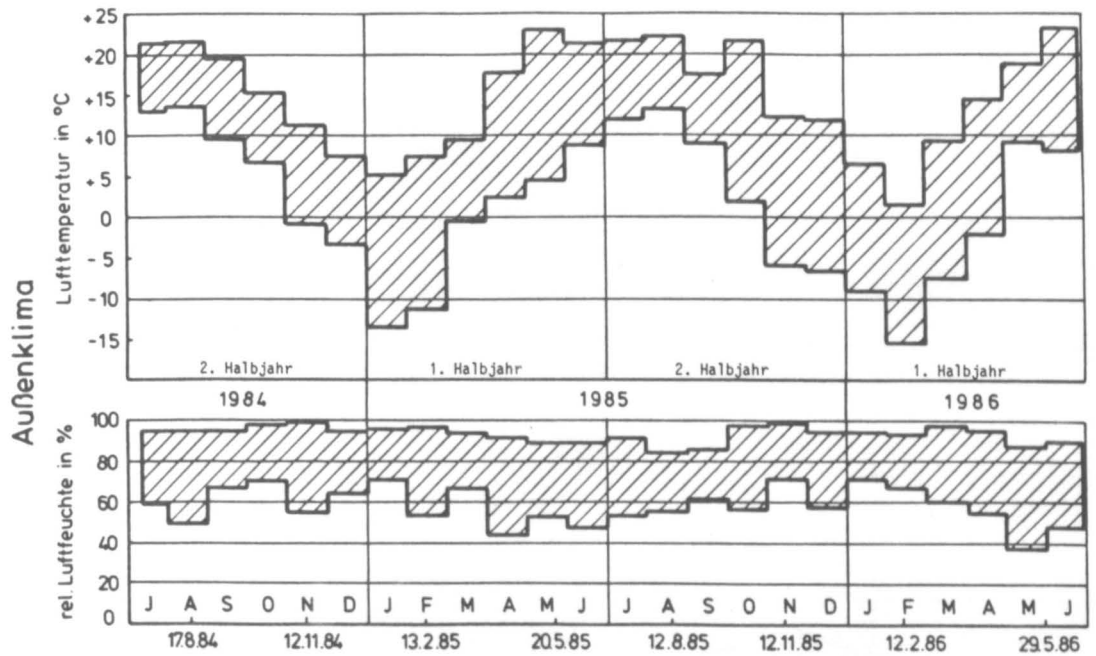
Lüftungsbohrung mit Lüfter, hygrostatgesteuert



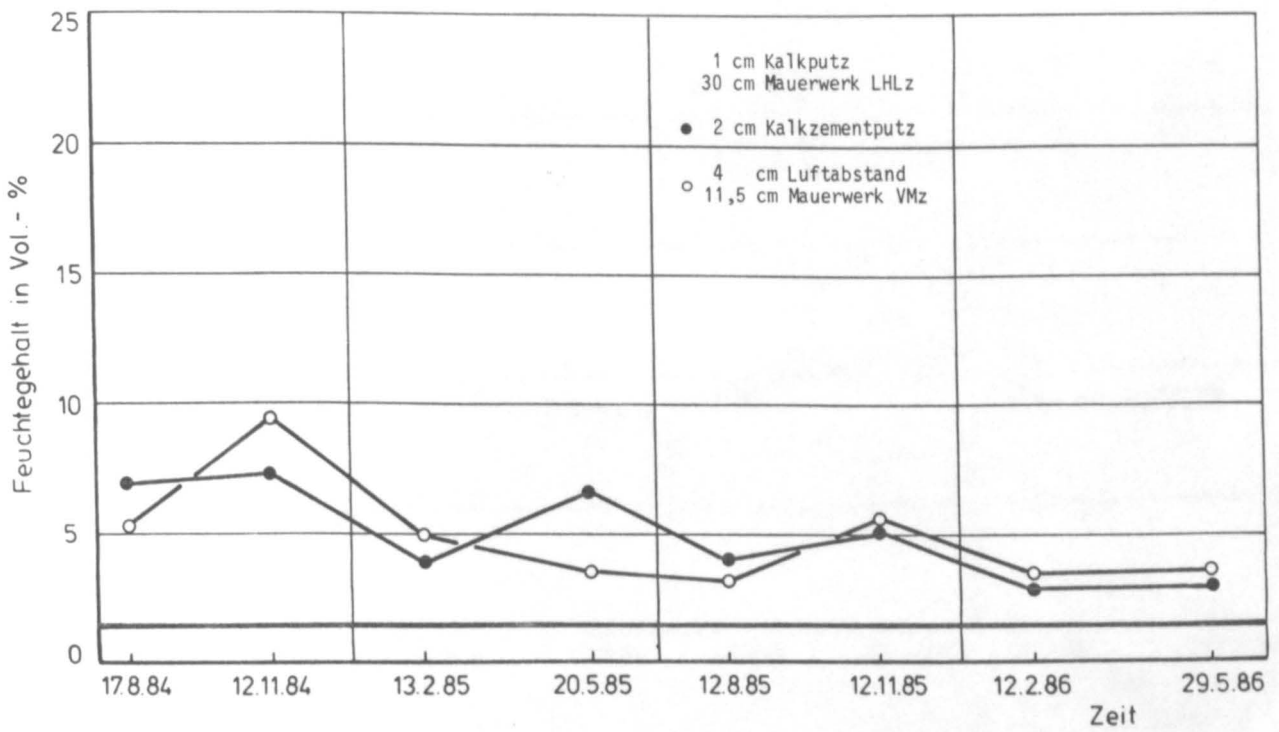
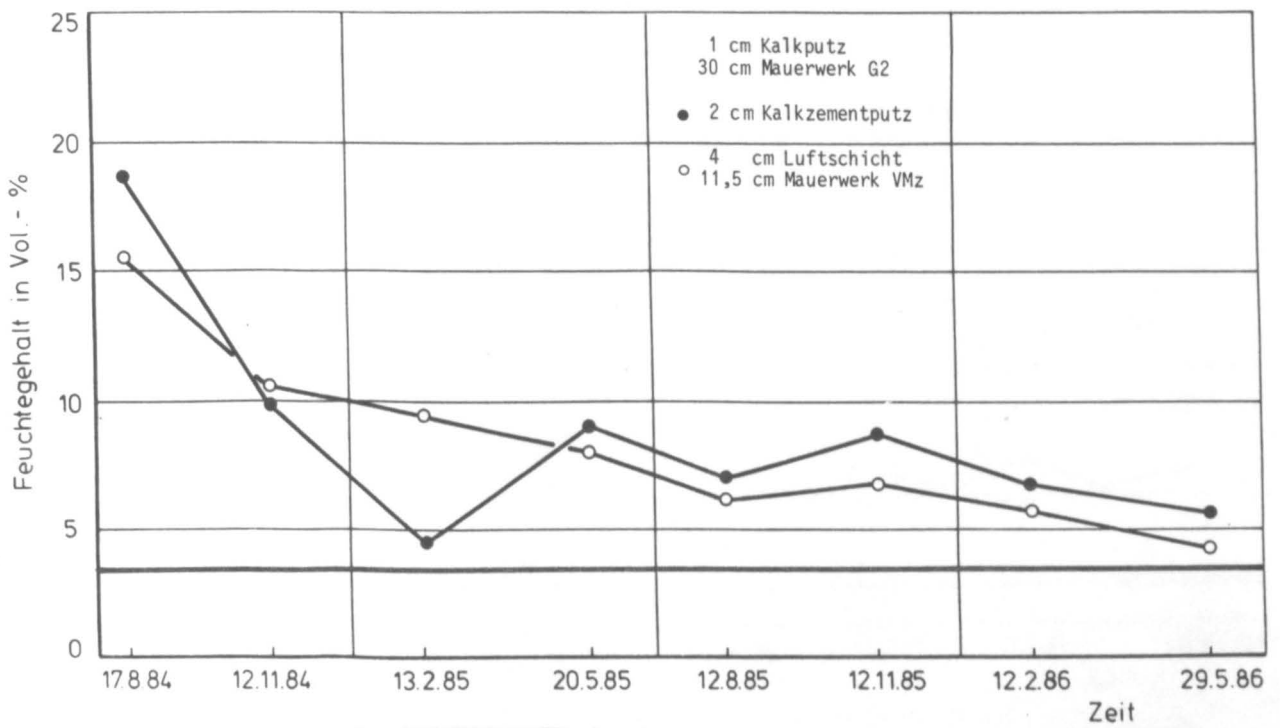
Heizlüfter, 2000 W, thermostatgesteuert



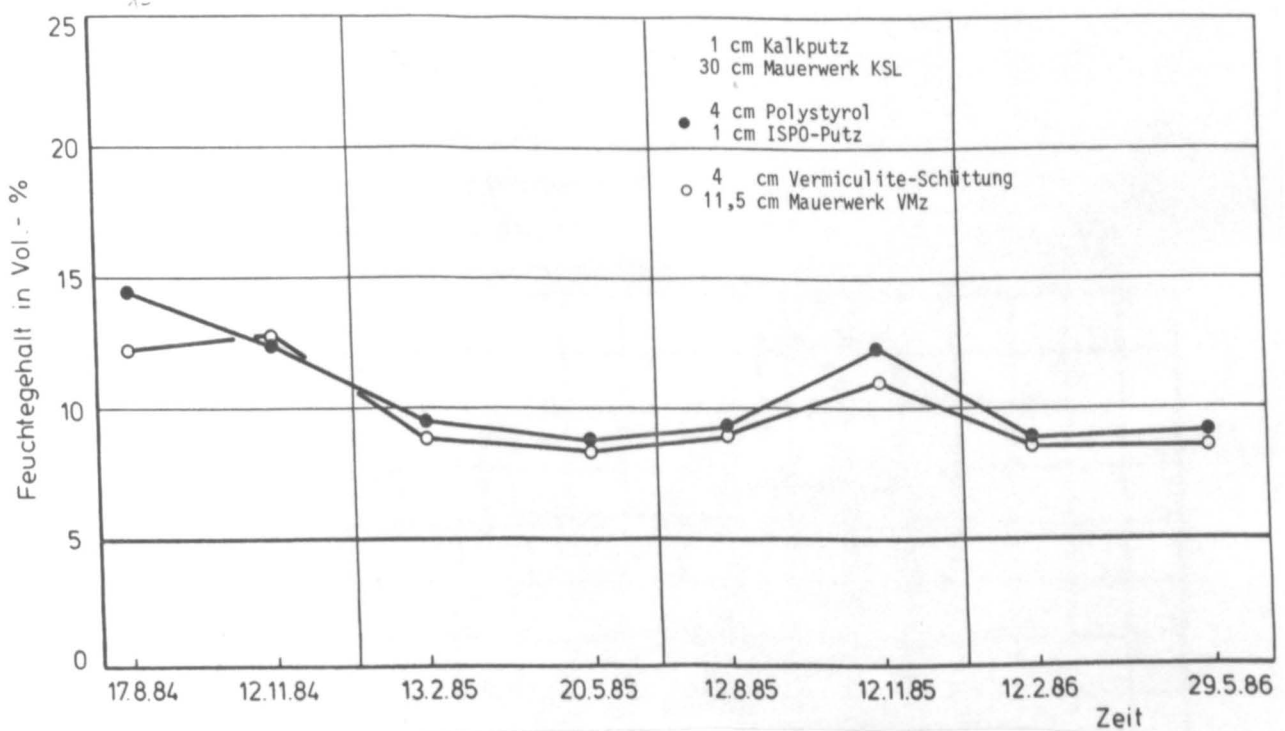
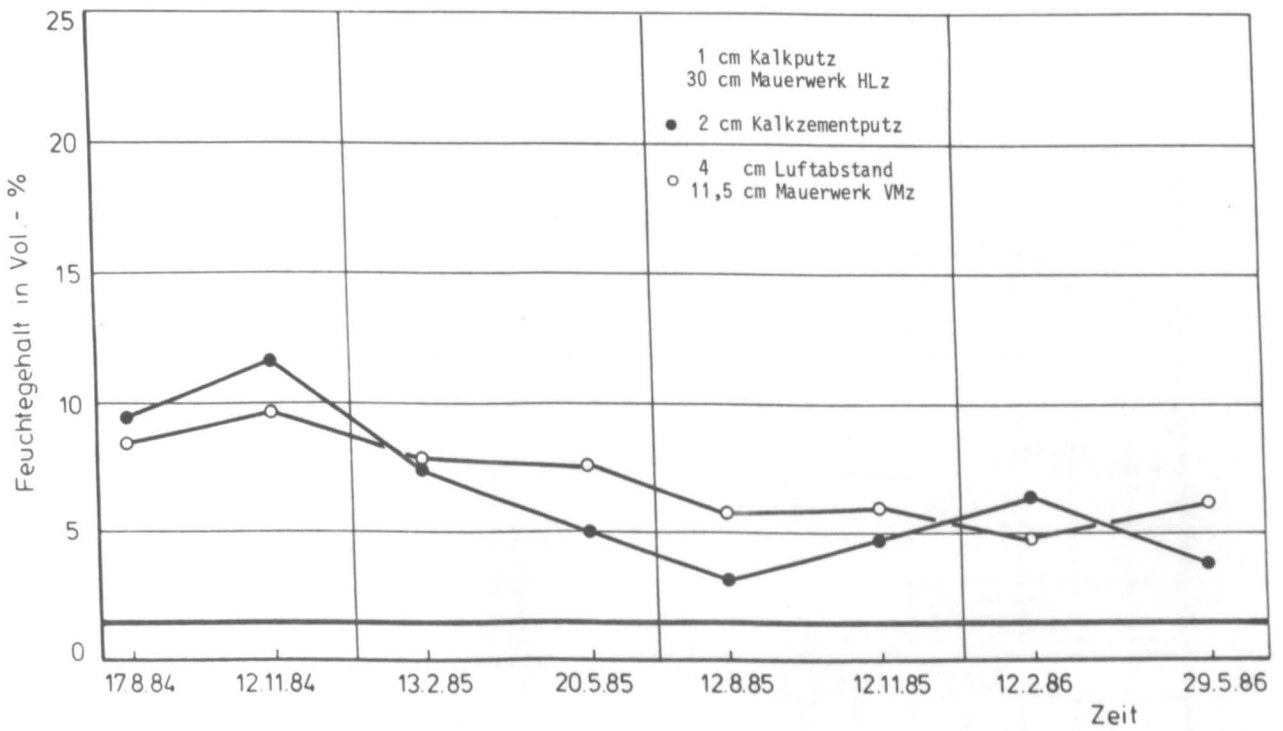
Luftentfeuchter Novatherm RSD, Typ CD 35

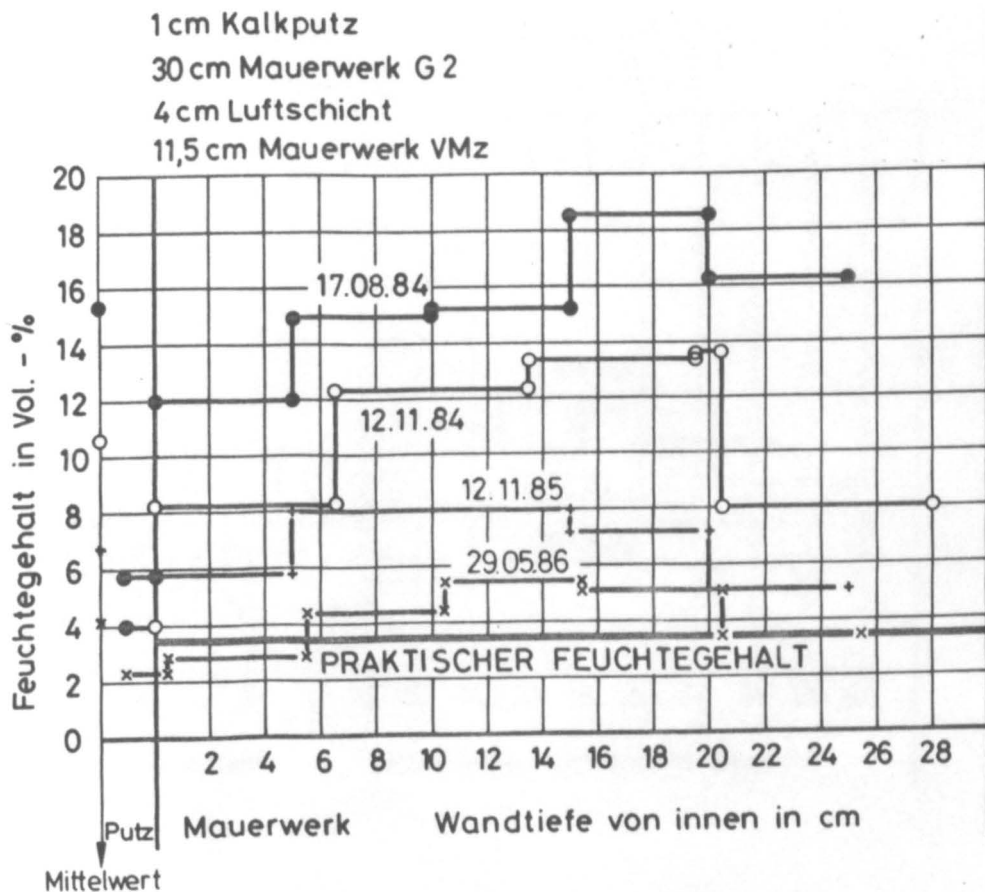
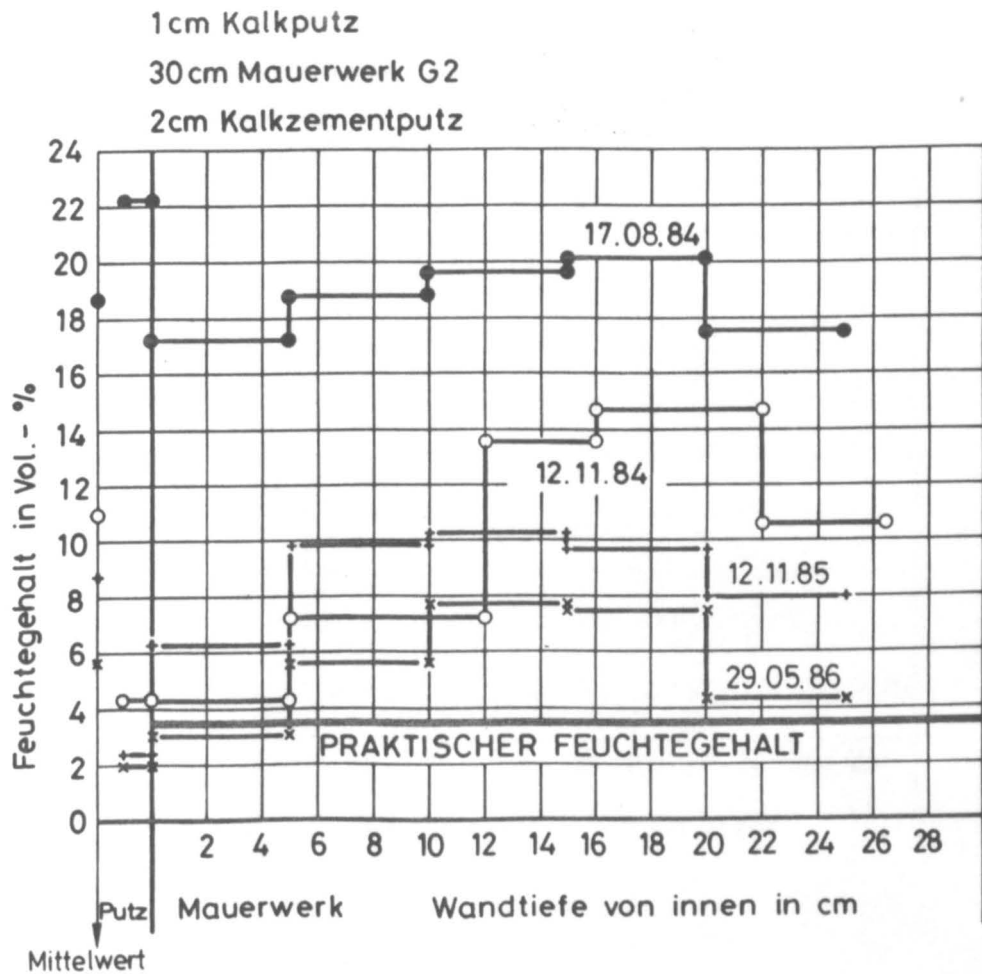


Anlage 4



Anlage 5





Anlage 7

